



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

**DEPARTAMENTO DE SISTEMAS Y
AUTOMÁTICA**

**“Diseño de un sistema de aislamiento de
vibraciones para un robot cuadrúpedo”**

**PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA**

Autor: Guillermo Vidal Borrella
Director: Néstor Eduardo Nava Rodríguez

Leganés, 2010



Índice:

1- Introducción	3
2- Estado del arte	9
2.1 - Historia de la robótica cuadrúpeda	11
3- Descripción y Modelado del sistema	17
3.1 – Diseño en Solid Edge	17
3.2 – Diseño en Adams	21
4- Simulación	31
4.1 – Simulación del cuadrúpedo caminando	32
4.2 – Simulación del cuadrúpedo en carrera	34
4.3 – Simulación del cuadrúpedo en el salto	35
4.4 - Modelo de vibraciones	38
5- Resultados de la simulación dinámica	40
5.1 – Resultados en el salto	40
5.2 – Resultados caminando	44
5.3 – Resultados corriendo	47
6- Cálculo del sistema de aislamiento propuesto	51
6.1 – Identificación del sistema	51
6.2 – Obtención del amortiguamiento y rigidez del del sistema de aislamiento	55
6.3 – Modelado del sistema en Adams	58
7- Validación numérica del sistema de aislamiento	60
7.1 – Resultados saltando	60
7.2 – Resultados caminando	62
7.3 – Resultados corriendo	64
7.4 – Análisis mecánico de los resultados	67
8- Conclusiones finales	71
Bibliografía	72

Capítulo 1

Introducción

Una fantasía que se encuentra, bajo diversas formas, en todas las épocas, consiste en poseer una máquina capaz de reproducir los movimientos y, hasta cierto punto, el comportamiento, de los seres humanos o de los animales, [1]. En tan solo dos siglos se ha producido una evolución notable en la tecnología no siendo así en algunas ramas que por diversos motivos no han evolucionado a tal velocidad. La robótica requería un nivel técnico y conceptual que ha retrasado el inicio de su desarrollo, pero actualmente asistimos a los primeros pasos de la revolución de esta disciplina que sin duda supondrá el principio de una nueva era para la raza humana. El inicio de la robótica se fija en el siglo XVIII con la construcción de una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas. Durante la revolución industrial estos mecanismos automatizados evolucionaron notablemente así como muñecos mecánicos que presentaban algunas características de los robots. Con la llegada de la imprenta, el cine y la gran difusión de los medios de comunicación, la portentosa imaginación del ser humano dispara el concepto de la robótica y la cantidad de proyectos relacionados con este campo. La familiaridad con la que la sociedad trata al robot es más llamativa cuando se compara con el amplio desconocimiento que se puede tener de otras máquinas o aparatos, aun siendo estos de mayor antigüedad o utilidad como por ejemplo, sería el osciloscopio o los parientes cercanos de los robots, las máquinas de control numérico, [3]. Será Devol en 1954 el primero en diseñar un robot programable y acuñar el término “autómata universal”. Pocos años después en 1959 la Planet Corporation se convierte en la primera empresa comercial de robots. Los primeros dispositivos que responden al que hoy se conoce como robot, no adoptaron inicialmente esta denominación. Los progenitores más directos de los robots fueron los manipuladores teleoperados. En 1984 R. C. Goertz del Argonne National Laboratory desarrolló, con el objetivo de manejar elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer sistema de teleoperación, [1]. Durante las siguientes décadas la evolución de la robótica se dispara enfocada generalmente a la industria y aparecen diversas líneas de investigación. Entre las cuales en este apartado destacamos la robótica móvil. Es posible clasificar y definir los robots desde diferentes puntos de vista:

“Máquina operada automáticamente que sustituye el esfuerzo de los humanos, aunque no tiene por qué tener apariencia humana o desarrollar sus actividades a la manera de los humanos”

Enciclopedia Británica.

“Máquina que se asemeja a los humanos y desarrolla como ellos tareas complejas como andar o hablar. Un dispositivo que desarrolla de manera automática tareas complicadas, a menudo de manera repetitiva. Un mecanismo guiado por control automático”

Diccionario Merriam Webster.

“Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas sólo a las personas”

Real Academia de la lengua Española.



Una vez explicado el término robot existen una serie de “clasificaciones”. Las principales clasificaciones dependen generalmente de la función o del uso al que se destina cada robot:

1) *Robot Industrial* (Robotic Industries Association): Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

2) *Robots de servicio* (Federación Internacional de Robótica): Un robot que opera de manera semi o totalmente autónoma para realizar servicios útiles a los humanos y equipos, excluidas las operaciones de manufactura. Dentro de la robótica de servicio podemos encontrar:

a) Robot doméstico: Aquel robot destinado a ser usado por humanos sin formación técnica específica, al objeto de servirle como ayudante o colaborador en sus quehaceres o actividades diarias.

b) Robots teleoperados (NASA): Dispositivos robóticos con brazos manipuladores y sensores y cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador.

c) Robot teleoperado (ISO): Un robot que puede ser controlado remotamente por un operador humano, extendiendo las capacidades sensoriales y motoras de éste a localizaciones remotas.

d) Telerobot: Cualquier robot cuya tarea pueda ser monitorizada y reprogramada a distancia por el humano.

e) Cobot: Dispositivo robótico que manipula objetos en colaboración física directa con él.

f) Robot móvil (ISO 8373): Robot que contiene todo lo necesario para su pilotaje y movimiento (potencia, control y sistema de navegación).

El primer documento de un mecanismo andador aparece sobre 1870 basado en mecanismos de cuatro barras y fue inventado por el Ruso P. L. Chebyshev en un intento por imitar un mecanismo andador de la naturaleza, [2]. Como suele ser habitual las primeras investigaciones fueron militares. Inglaterra y los Estados Unidos financiaron gran cantidad de proyectos que estudiaban el uso de mecanismos caminantes como maquinas de guerra, [2]. Basados en el número de patas que tiene el robot, serán bípedos como los humanos o los pájaros, cuadrúpedos como los reptiles y los mamíferos, hexápodos como los insectos y octópodos como las arañas. Robots con una pata (Raibert's hopper), con tres patas (Osu Triped), con cinco patas (Hitachi hybrid robot), ocho patas (Recus) o más patas (Zykov) es poco usual pero no imposible, [3]. Los robots caminantes presentan ventajas sobre los que utilizan orugas o ruedas. A continuación se explican cada una de estas ventajas:

a) Movilidad: Los robots con patas exhiben mayor movilidad que los que utilizan ruedas porque poseen intrínsecamente mecanismos de dirección omnidireccional. Esto significa que pueden cambiar de dirección sobre el eje principal del cuerpo tan solo moviendo sus apoyos (patas). También pueden girar sobre los ejes de su cuerpo sin necesidad de levantar las patas apoyadas con solo mover sus articulaciones, es decir puede rotar su cuerpo, inclinarlo y cambiar de posición.



b) Superación de obstáculos: Un robot con patas puede superar obstáculos que estén a baja altura en comparación con el tamaño del robot. Donde un robot con ruedas quedaría atascado si el tamaño del obstáculo fuera mayor que el radio de la rueda.

c) Suspensión activa: Intrínsecamente un robot con patas posee suspensión por adaptación mediante la variación de la altura de su cuerpo con la posición de sus patas a un terreno irregular. De esta manera su movimiento puede ser más suave que un robot con ruedas pues este último siempre estará paralelo al suelo adoptando posiciones similares al relieve del terreno.

d) Eficiencia energética: Se ha vertido mucha tinta respecto a este tema pero fue Bekker quien probó la teoría de Hutchinson que fue el primero en atreverse a decir que un robot con patas sería más eficiente energéticamente que uno con ruedas en un terreno altamente irregular. En función del terreno natural o discontinuo, los robots con ruedas requieren una superficie continua para desplazarse de manera eficiente. En un principio los robots con patas no requieren un terreno continuo y pueden desplazarse por terrenos arenosos, fangoso, escarpado y liso.

e) Deslizamientos: Una rueda puede deslizarse en una superficie por motivos de adherencia, las patas de un robot suelen depositar el peso del robot de forma directa sobre el suelo y las posibilidades de que resbale son menores. Dado que el movimiento siempre va en la dirección de la resistencia.

f) Daño medioambiental: Las ruedas erosionan la superficie de la tierra cuando derrapan y la dejan desprotegida. Los robots con patas no desgarran la tierra de este modo, ya que se posan sobre esta de forma puntual y discreta.

g) Velocidad media: Un robot con patas puede superar pequeños obstáculos manteniendo la velocidad del cuerpo constante con un movimiento uniforme y rectilíneo si fuera necesario o si el teleoperador o programador así lo deseara.

Por supuesto los robots con patas no son la solución general a la locomoción robótica, presentan una serie de problemas y desventajas que los han mantenido fuera de uso industrial y de servicios. El primer problema es la complejidad, los robots con patas son más complejos que los que utilizan ruedas sobre todo en lo referente a electrónica y control. Otro problema importante es la velocidad y el más crítico, el coste. A continuación se describen las desventajas una por una:

a) Mecánica: La rueda es un mecanismo extremadamente sencillo sin embargo una pata consiste en varios enlaces y articulaciones. Una pata requiere al menos tres actuadores para proveerla de dirección y tracción y permitir un movimiento completo. Un robot caminante con equilibrio estático requiere al menos cuatro patas, por lo tanto el número mínimo de actuadores para un robot caminante es de doce. No se está considerando la posibilidad de robots bípedos puesto que el número mínimo de actuadores por pata no está concretamente definido y se pretende definir un robot que pueda realizar movimientos en todas direcciones. Con lo cual un sistema de locomoción por patas es más complejo y más caro que un sistema de locomoción por ruedas.

b) Electrónica: Cada articulación del robot está asociada a un controlador y debe ser controlada de manera individual. De nuevo, los robots caminantes requieren más sensores que un robot con ruedas dado que las ruedas están en todo momento en contacto con el suelo esto significa que se debe implementar algún mecanismo que permita determinar cuándo una pata está en contacto con el suelo.



c) Algoritmos de control: Un robot caminante debe coordinar la posición de todas sus articulaciones para realizar cualquier movimiento, por lo que un robot caminante es sin duda más complejo que un robot con ruedas o con orugas.

d) Velocidad máxima: Un mecanismo de locomoción por ruedas en superficie terrestre puede alcanzar una velocidad máxima conocida de 1228 Km/h alcanzada por el Thrust SSC, [18]. Mientras que el mecanismo de locomoción por patas más veloz conocido es el guepardo que alcanza 113Km/h. El único inconveniente es que el guepardo aun no puede ser teleoperado.

e) Coste: El coste total de cualquier sistema suele ser siempre proporcional a su complejidad, por tanto un sistema robótico de locomoción por patas será más caro que un sistema de locomoción por ruedas.

Una vez conocidas las ventajas y desventajas de los robots caminantes surge la siguiente cuestión, el número de patas. En los siguientes apartados se tratan los robots comunes con equilibrio estático. El equilibrio estático es aquel en el que el cuerpo del robot puede estar en reposo con velocidad cero. Lógicamente a medida que el número de patas aumenta, las posibilidades de equilibrio del robot aumentan si se mueve una pata o varias.

a) Octópodos: Son muy rápidos puesto que pueden mantener cuatro patas apoyadas mientras avanzan las otras cuatro. Muy estables pues podrían mantener hasta siete patas apoyadas y realizar avances de una en una. Podrían cargar con más peso pues queda distribuido en muchas patas. Desventajas, tantas patas son redundantes, se incrementa el consumo, la complejidad de los algoritmos y requieren más baterías. Todos estos factores confluyen en el mismo problema crítico, el incremento del coste.

b) Hexápodos: Más rápidos que los cuadrúpedos y los bípedos pero menos que los octópodos. Presentan las mismas características que un octópodo pero con dos patas menos, con todo lo que ello conlleva en cuando a reducción de estabilidad y costes.

c) Cuadrúpedos: Son los más recomendables pues la estabilidad que presentan mientras caminan es muy superior a la de los bípedos y tan solo un poco inferior a la de los hexápodos y octópodos dado que utilizan tres patas como apoyo mientras realizan el avance de una de las patas. Su velocidad es muy inferior a la de estos dos pero su coste es más reducido.

d) Bípedos: Presentan muy poca estabilidad dado que deben apoyar todo su peso sobre una sola pata mientras realizan el avance de la otra, de este modo deben cargar todo el peso de las baterías sobre una sola pata, lo que reduce notablemente su autonomía. Se trata de una de las plataformas de locomoción más desarrolladas por el ser humano principalmente por su latente predisposición a replicarse a sí mismo.

Hay un motivo por el cual la robótica cuadrúpeda destaca con respecto al resto de las disciplinas. La naturaleza sigue una mecánica de ensayo error sin precedentes. Durante milenios ha probado y desarrollado sistemas de locomoción. Las ruedas no han sido desarrolladas por motivos técnicos y biológicos. Las plataformas de locomoción más desarrolladas por la naturaleza han sido las caminantes. Existen octópodos (arañas), hexápodos (insectos), cuadrúpedos y bípedos (mamíferos), pero todos se rigen por una serie de reglas. No existe ningún animal que pese más de 100 gramos con seis o más patas. Serían redundantes, el animal chocaría constantemente con sus propias patas. La naturaleza con millones de años de experiencia ha proclamado como mejor plataforma de locomoción caminante a la cuadrúpeda. Se trata de un hecho indiscutible. Los mamíferos en su inmensa mayoría son cuadrúpedos y como se ha comentado anteriormente, el guepardo es una auténtica obra de ingeniería que el ser humano tan solo sueña con imitar.

El estudio de las vibraciones mecánicas se ha convertido en algo esencial para el diseño y montaje de cualquier instalación industrial, ya que el buen funcionamiento de maquinaria mecánica (y de la instalación en general) está relacionado en muchos casos con su comportamiento vibratorio. Toda maquinaria que por su diseño tenga elementos móviles o rotatorios, produce un desequilibrio conocido como vibración. Desde que aparecieron los primeros instrumentos musicales, en especial los de cuerda, se empezó a mostrar un interés por el estudio del fenómeno de las vibraciones. Galileo encontró la relación existente entre la longitud de la cuerda de un péndulo y su frecuencia de oscilación. Además encontró la relación entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas. Estos estudios y otros posteriores ya indicaban la relación que existe entre el sonido y las vibraciones mecánicas. A lo largo de la historia, grandes matemáticos elaboraron importantes aportaciones que hicieron del fenómeno de las vibraciones toda una ciencia. Hoy en día se ha convertido en una de las ramas más estudiadas y aplicadas en la industria. Podemos mencionar, entre otros autores, Taylor, Vernoulli, D' Alembert, Lagrange, Fourier, y más en concreto Hooke y su ley sobre la elasticidad en 1876, o Coulomb que dedujo la teoría y la experimentación de oscilaciones torsionales, incluso Rayleigh con su método de energías. Fueron grandes físicos que estructuraron las bases de las vibraciones como ciencia. En la actualidad, las vibraciones mecánicas tienen una gran importancia pues todos estamos en continuo contacto con ellas y sus efectos difieren. El buen funcionamiento de los amortiguadores de un automóvil, el mal aislamiento de maquinaria que pueda dañar la infraestructura de la misma y zonas cercanas, el ruido causado por maquinaria, son algunos ejemplos. El buen funcionamiento de la maquinaria industrial es un fenómeno que requiere de una constante inspección, pues las vibraciones acarrearán diferentes problemas como la reducción de la vida de la máquina por la fatiga de sus componentes o la transmisión de vibraciones y ruido excesivo. Por lo tanto el objetivo de un buen aislante de vibraciones debe resolver o disminuir en la mayor medida posible, problemas como los descritos, ya sea en maquinaria móvil como en estática. Es muy importante preservar a las personas y al medio ambiente de los efectos producidos por los ruidos y vibraciones.

En esta introducción se han mencionado algunos aspectos sobre la robótica en general y las vibraciones que producen las máquinas. Evidentemente este proyecto trata de analizar las vibraciones producidas por un robot y en concreto se pretende aislar las vibraciones producidas por el motor de un robot cuadrúpedo llamado "HyQ". Los objetivos principales son:

- 1) Modelado mediante el uso de un programa de diseño en 3D del robot "HyQ".
- 2) Realización de simulaciones dinámicas en diferentes modos de funcionamiento en los que puede operar el robot "HyQ".
- 3) Diseño y cálculo de un sistema de aislamiento de las vibraciones producidas por el motor que permite moverse al robot.
- 4) Análisis de la efectividad de dicho aislamiento.

Este documento se centra en la robótica móvil y en concreto de la robótica cuadrúpeda. Se analizan aspectos mecánicos de un robot de servicio, pues no realiza tareas industriales. La aparición de estos robots cuadrúpedos en la industria es cada vez más intensa y es esencial el estudio de las posibilidades, ayudas y avances que este tipo de robots puede ofrecer. Para el modelado se usará el programa Solid Edge, que permite montar totalmente el sistema y diseñar el mismo. Las simulaciones dinámicas se realizan con el programa Adams, con el que se pueden realizar simulaciones de los movimientos reales del cuadrúpedo. Las simulaciones que se realizan en Adams permiten establecer comparaciones entre diferentes formas de movimiento e incorporar elementos vibratorios o no hacerlo. El análisis de las simulaciones con o sin vibraciones muestran resultados muy interesantes que no se podrían llevar a cabo en la realidad, pues es imposible mover cualquier máquina si su motor está apagado. Las potentes



herramientas informáticas de las que se dispone hoy en día en el mundo de la industria, han permitido la realización de exhaustivos análisis en este proyecto. Con los resultados obtenidos, deberá evaluarse si los parámetros calculados han sido útiles y efectivos, a la hora de aplicarlos al modelo en 3D diseñado.

Capítulo 2

Estado del arte

En la actualidad los robots móviles se sirven de diferentes mecanismos de locomoción. Es posible clasificar estos mecanismos según un determinado enfoque. Los enfoques más importantes para clasificar el movimiento del robot son:

- Enfoque *biológico*: Busca concebir un sistema locomotor basado en características propias de organismos vivos, aprovechando las ventajas que estas puedan obtener de cada caso determinado. Un ejemplo lo constituyen el trabajo en cockroach like robots, [6], y el robot Hamlet, [7], entre tantos otros.

- Enfoque *aplicativo*: Trata de encontrar una solución efectiva, tratando de optimizar algún aspecto del diseño. Este enfoque es más común en aplicaciones industriales y comerciales. Algunos ejemplos son los desarrollos de la Nasa en exploración planetaria con el robot Dante II, [8], y la maquina caminante adelantada por Plustech, [9], la cual se adapta satisfactoriamente al terreno selvático.

- Enfoque *modernista*: Este enfoque está orientado a la investigación, trata de enriquecer las estrategias de locomoción explorando métodos poco convencionales.

Como resultado de los diferentes enfoques, en la actualidad existe una gran cantidad de aplicaciones robóticas móviles, que pueden agruparse de acuerdo con el tipo de mecanismo de locomoción que utilizan. En general destacan las ruedas y las patas, aunque existen otros modos de locomoción:

- Ruedas: La rueda es un método altamente probado, que presenta una gran cantidad de ventajas y es muy eficiente en superficies homogéneas poco inclinadas. Su aplicación en un robot es producto del enfoque aplicativo antes descrito. En la figura 1 se muestra un robot que usa la rueda como medio de locomoción.



Figura 1. Robot con ruedas, Rovver 400

- Patas: Estos son, evidentemente, mecanismos producto del enfoque biológico. Sus ventajas, entre otras, son la adaptabilidad al terreno y la posibilidad de omnidireccionalidad. Se encuentra una gran variedad de diseños y aplicaciones comerciales como el robot Aibo, [10], y el robot bípedo Asimo, [11], robots industriales como la máquina caminante de Plustech, [9], máquinas exploratorias como el robot Dante II, [8], entre otras. Debe ser destacado el robot Nao, [15], que será la nueva plataforma bípeda oficial de la RoboCup, [16], que se muestra en la figura 2. A medida que pasa el tiempo y se sigue avanzando en el desarrollo de los robots, es más frecuente cada vez encontrar robots bípedos, intentando parecerse lo más posible al ser humano. Imitar al ser humano y poder realizar tareas cotidianas es un reto que se han propuesto los principales investigadores y fabricantes. En la figura 2 podemos observar el robot bípedo Nao, el cual es un buen ejemplo de semejanza entre algunos robots bípedos y el ser humano. La figura 3 muestra un robot con patas articuladas y ruedas en sus extremos.



Figura 2. Robot Bípedo, Nao



Figura 3. Robot Híbrido Roller-Walker

- Híbridos: Algunos métodos utilizan combinaciones entre ruedas y patas como las Whegs, [12], y el robot Shrimp, [13]. Otros son adaptaciones que han resultado convenientes para algún tipo de terreno o alguna aplicación, como el robot saltador para exploración planetaria de Fiorini, [14]. La figura 3 es un ejemplo de robot híbrido en el que se puede observar cómo los apoyos de sus patas tienen forma circular, y en función de la orientación de dichos apoyos, el robot se desplaza moviendo las patas o girando las ruedas.

- Robots Voladores: Se trata de un tipo especial ya que suelen ser robots teleoperados más orientados a la aeronáutica que a la robótica. Aunque su utilización es menor que la de los demás robots por motivos tecnológicos, cada vez es más frecuente la aparición de estos robots en la industria.

2.1 – Historia de la robótica cuadrúpeda:

En este apartado se van a exponer las plataformas robóticas cuadrúpedas más avanzadas del momento explicando los detalles que las hacen especiales, pasando de robots enfocados a la investigación, a los robots orientados a la venta o la robótica como hobby. Se recomienda a todos los lectores de este documento que busquen videos de los dispositivos robóticos que van a ser expuestos a continuación pues una imagen vale más que mil palabras y en la robótica lo importante es conocer como se desenvuelve un robot durante la realización de una tarea.

2.1.1 BigDog:

Como no podía ser de otro modo, es necesario comenzar por el robot cuadrúpedo con equilibrio dinámico más avanzado en la actualidad. BigDog es un robot cuadrúpedo de equilibrio dinámico creado en 2005 por Boston Dynamics, [19], con Foster Miler, el Jet Propulsion Laboratory, [20], y Harvard University Concord Field Station, [21]. En la figura 4 puede verse una foto del robot BigDog.

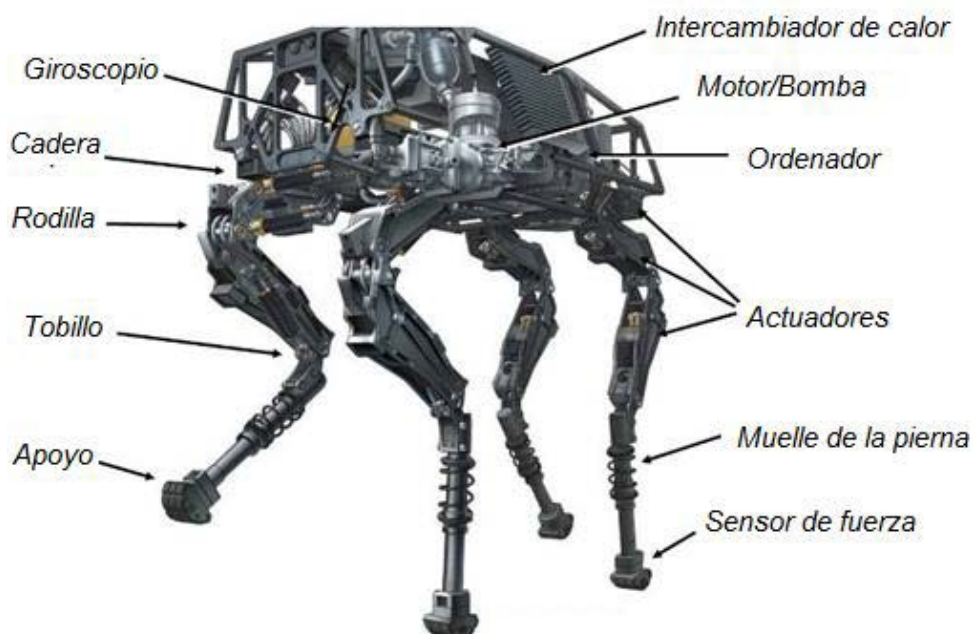


Figura 4. BigDog

Si impresiona verlo parado, todavía es más interesante observarlo en movimiento y apreciar su agilidad, velocidad y movimientos precisos al saltar o correr. BigDog financiado por Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), se creó con la esperanza de hacer posible que una mula mecánica acompañara a los soldados cargando con el pesado equipamiento de estos en terrenos demasiado escarpados para vehículos convencionales rodados. Utiliza una gran variedad de sensores entre los que se destaca un giróscopo laser y un sistema de visión estereoscópica además de encoders en las articulaciones y sensores de contacto con el suelo. BigDog mide 1 metro de largo, 70 centímetros de alto y pesa 75 kilos siendo del tamaño de una mula pequeña. Es capaz de atravesar terrenos difíciles a una velocidad de 5,3 Km/h, cargar con 54 Kg y subir superficies de hasta 35° de inclinación. Sus patas están dispuestas como las de un perro, posee cuatro grados de libertad por pata, utiliza un motor de gasolina y el sistema de locomoción es hidráulico. Todo el movimiento está gestionado por un ordenador de abordo que recibe la entrada de los sensores. Este proyecto cuenta con una gran financiación y el coste esta a la altura de los resultados obtenidos siendo ambos muy elevados.

2.1.2 LittleDog:

LittleDog es el hermano pequeño de BigDog, está desarrollado por Boston Dynamics, [19], y financiado por DARPA. Se trata de un robot cuadrúpedo de equilibrio estático. LittleDog tiene el equilibrio entre control dinámico, percepción del medio ambiente y la locomoción todoterreno. Cada pata cuenta con tres grados de libertad accionados por tres motores, cada uno de estos son lo suficientemente fuertes como para moverle e incluso conseguir que escale por terrenos tan accidentados como el que se ve en la figura 5. Las patas tienen una amplia gama de movimientos. LittleDog utiliza una gran cantidad de sensores similares a los de BigDog. Dispone de sensores de medida de ángulos articulares, orientación del cuerpo, contacto con el suelo, etc. Utiliza baterías LiPo que son muy livianas y almacenan gran cantidad de energía dotándole de una autonomía de 30 minutos. Puede ser teleoperado gracias a su comunicación inalámbrica. Este robot es capaz de hacer frente a las superficies más irregulares a una velocidad asombrosa, es uno de los robots adaptativos más versátil de los que utilizan equilibrio estático. A pesar de tener un tamaño pequeño, es capaz de desplazarse por cualquier superficie irregular. Su pequeño tamaño y su peso ligero hacen de este un robot especialmente interesante.



Figura 5. LittleDog

2.1.3 SILO4:

SILO4 es una máquina caminante de tamaño mediano, cuadrúpeda construida y desarrollada con fines educativos por el Instituto de Automática Industrial del CSIC, [22]. Es compacto, modular, robusto, capaz de caminar por terrenos irregulares y supera obstáculos de hasta 25 cm de alto cargando con 15 Kg, a una velocidad máxima de 1,5 Km / h. SILO4 fue concebido para su uso interior, pero puede trabajar en el exterior bajo condiciones no extremas. Esto significa que puede trabajar en terrenos irregulares en el exterior pero no durante una tormenta. La mecánica del SILO4 consta de cuatro patas idénticas colocadas alrededor del cuerpo. El “pie” que se considera al final de la pata y es el que hace contacto con el suelo, puede adoptar diferentes configuraciones. Las patas están situadas alrededor del cuerpo en una configuración circular (todas se encuentran a la misma distancia del centro del cuadrado que forma su cuerpo). En la figura 6 podemos observar la distribución de las patas y la forma del cuerpo. En un robot de equilibrio estático esta configuración de patas permite moverle omnidireccionalmente debido a la distribución sobre los ejes transversales del cuerpo. Éste es prácticamente un cubo de 30x30x31 cm. Dentro del cuerpo se encuentran todas las tarjetas y controladores de los motores. También contiene inclinómetros de dos ejes que proveen al robot del “pitch” y el “roll” que son los ángulos en los que se encuentra el cuerpo del robot. El cuerpo está construido en aluminio, este material cumple las necesidades básicas para la robótica cuadrúpeda pues es resistente y muy liviano. El peso total del cuerpo del robot es de 14 Kg contando con el peso de la electrónica. Las patas siguen la configuración tipo insecto, en la que los ejes de la segunda y tercera articulación son paralelos entre sí y perpendiculares al eje de la primera. El motor está incluido dentro de la pata del robot, se trata de un motor de corriente continua y cada articulación hace uso de uno de ellos. La segunda y tercera articulación utilizan un engranaje en forma de espiral y un tornillo sin fin, de este modo cuando una pata tiene que mantener la posición solo es necesario cortocircuitar el motor pues el rozamiento de los engranajes sujetaría el peso del robot. El diseño del pie del robot SILO4 consiste en una articulación pasiva universal que conecta la tercera pieza de la pata con otra articulación pasiva. Gracias a esta doble articulación en dos ejes el pie puede adaptarse al terreno perfectamente. El otro diseño del pie, se trata de un apoyo puntual del pie, por lo que no es adaptativo y reduce la estabilidad del robot pero puede ser útil en determinadas circunstancias. El diseño completo del robot SILO4 se puede encontrar en internet, todas las piezas están acotadas y sus planos están colgados en internet e incluso se pueden encontrar los planos de ensamblaje. En la figura 6 se muestra el robot SILO 4.



Figura 6. SILO4

2.1.4 Aibo:

Aibo (“amigo” en japonés) es un robot mascota fabricado por Sony, [10]. Dispone de sensores que le evitan chocar contra objetos y una cola que funciona de antena, además de “sentido del tacto”. El proyecto se inició en 1990 con el desarrollo de un robot de seis patas llamado “prototipo 1” siendo la primera incursión de Sony en el mundo de la robótica. En 1991 se desarrolló el “prototipo 2”, un robot cuadrúpedo que comenzaba a asemejarse al robot Aibo. El primer Aibo se vendió el 1 de Julio de 1999, por lo tanto se puede determinar que una gran empresa como Sony necesitó nueve años para desarrollar un robot cuadrúpedo como mascota y que fuera “rentable”. La evolución de este robot continuó hasta llegar el modelo Aibo ER7-EM3 (figura 7) que será el más avanzado de esta serie, pues en 2006 Sony canceló su fabricación y desarrollo. El robot Aibo ERS-7M3, se trata de un robot cuadrúpedo con las patas en configuración tipo caballo, se basa en el equilibrio estático y fue la plataforma oficial cuadrúpeda de la RoboCup, [16]. Aibo cuenta con un total de 20 grados de libertad de movimiento, 3 en la cabeza, 1 en la boca, 3 en cada pata, 1 en cada oreja y 2 en la cola. Contiene dos sensores de distancia por infrarrojos, un sensor de aceleración, un sensor de vibración y varios sensores de tacto en la cabeza, el lomo, la parte inferior de la boca y en las patas. Pesa 1,6 Kg incluyendo batería y memory stick que es donde almacenaba los programas. Su autonomía es de una hora y media. Al comprarlo incluye una estación de carga donde el robot va a recargarse cuando detecta que las baterías están descargándose. Se pretendía que Aibo fuera una especie de mascota multimedia por eso le dotaron de WiFi, altavoces, una cámara web alojada en el morro y un micrófono. Se le dotó de una inteligencia artificial que pretendía imitar el comportamiento de un animal, el software de control de este último modelo fue llamado Mind y la versión de este último modelo fue la 3. Mind3 controla a Aibo cuando está en modo autónomo, pero también puede recibir órdenes del PC o incluso de otros dispositivos móviles. Este software es capaz de hacer que Aibo reconozca caras, y además le dota de un avanzado sistema de reconocimiento de voz, permitiendo de esta forma, no sólo recibir numerosos comandos en inglés, sino también establecer pequeños diálogos entre el hombre y la máquina. También controla el reloj interno de Aibo, para adaptarse al ritmo de vida de su dueño. Mind3 irá forjando la personalidad de Aibo dependiendo de las experiencias y sensaciones que Aibo experimente. De esta manera, cada Aibo es único. Debe ser destacado que el proyecto Aibo y Qrio de Sony no fueron cancelados por no tener perspectivas de ser rentables en el futuro sino por motivos internos de la compañía. Aibo es uno de los robots comerciales que tenían más perspectiva de futuro y que más se han vendido. Del mismo modo son un estandarte para la robótica actual cuadrúpeda.



Figura 7. Aibo ERS-7M3

2.1.5 Kits cuadrúpedos Lynxmotion:

Lynxmotion, [23], es una página web de robótica como hobby. Durante los últimos años se ha ido posicionando como una de las mejores en este segmento cada día más creciente. En su página web se pueden encontrar dos kits de robots cuadrúpedos el Extreme Quadrapod 2 y el Extreme Quadrapod 3. La figura 8 muestra una imagen del Extreme Quadrapod 3, pues es el más avanzado. El Extreme Quadrapod 2 cuenta con dos grados de libertad por pata, esto abarata su coste pero también reduce sus posibilidades dado que la punta de la pata al desplazarse no dibuja líneas rectas sino que traza semicírculos, el robot será menos estable y preciso. El robot está construido en látex estructural cortado con laser y los servomotores son Hitec HS-422. El precio de este robot sin electrónica, solo piezas y servos es de 219 \$. El otro modelo es el Extreme Quadrapod 3, éste cuenta con 3 grados de libertad situados como los del robot SILO4, la segunda y tercera articulación están en ejes paralelos y la primera en un eje perpendicular. Con esta configuración tenemos una plataforma robótica perfecta para poder aprender y desarrollar algoritmos a un nivel profesional. Este último robot por sus características puede ser utilizado como un prototipo de un robot más grande que utilice la misma configuración de patas. El problema de estos robots es el tamaño y la fuerza de los servos, no se pueden incluir a esta escala muchos sensores, porque es muy complicado alojarlos en patas tan pequeñas y por los problemas derivados del peso y el consumo.

2.1.6 Roboquad:

Uno de los robóticos más conocidos de la actualidad es Mark W. Tilden por el desarrollo de los BEAM robots. Estos respondían a una pequeña inteligencia artificial sin chips, tan solo utilizaban elementos electrónicos sencillos, algunos eran capaces de destruir a otros robots para defender su territorio y poseían una memoria sencilla. Más tarde Tilden sorprendió al público general desarrollando el RoboSapien producido por la empresa de juguetes Wow Wee. Este fue uno de los primeros robots comerciales de bajo coste que triunfaron. RoboSapien era reprogramable y fácil de utilizar incluso podía ser teleoperado con un mando a distancia o una PDA. A RoboSapiens le siguieron RoboRaptor, RoboReptile, RoboPet y el que vamos a estudiar a continuación RoboQuad. La figura 9 muestra una imagen del robot Roboquad y da una idea de los importantes avances que se han conseguido en el campo de la robótica.



Figura 8. Extreme Quadrapod 3 Lynxmotion



Figura 9. RoboQuad de Wow Wee

El robot de la figura 9 se asemeja a un insecto y a un perro, posee cuatro motores en la patas, un motor en la cabeza y otro en el cuello, un sensor de luz, un sensor de infrarrojos, visión por infrarrojos y un micrófono. RoboQuad tiene cinco modos de uso, control directo, modo autónomo, modo guardián, dormido y un demo. De serie viene con cuarenta movimientos programados, y setenta y dos funciones reprogramables. Se trata tan solo de un juguete pero es algo más, es una demostración de que la robótica está cada día más presente en nuestro mundo aunque sea de esta forma. Es un ejemplo de rentabilidad económica en el mundo de la robótica, que a decir verdad no hay muchos.

La robótica cuadrúpeda ha evolucionado notablemente en los últimos años, solo hay que ver los alcances conseguidos por los proyectos presentados en la sección anterior. Pero aún queda mucho camino por recorrer. El diseño de patas con más funcionalidades, incluso inteligentes, y la mejora de los algoritmos de control de estabilidad, serán los objetivos a mejorar para conseguir una nueva generación de robots capaces de realizar tareas que actualmente solo pueden ser llevadas a cabo por los seres humanos. Algún día los robots dejarán de ser máquinas torpes y pesadas que realizan tareas sencillas. Algún día los robots serán el pilar principal del desarrollo de los seres humanos, nos cuidarán e incluso tomarán decisiones por nosotros con mucho más criterio. Ese día, todos los que contribuimos a llegar a ese punto de desarrollo nos sentiremos orgullosos.

Capítulo 3

Descripción y modelado del sistema

Este apartado explica cómo se ha realizado el montaje de las piezas en Solid Edge y Adams. El diseño del robot ha sido realizado por el IIT (Istituto Italiano de Tecnología), pero el conjunto motor y alguna pequeña pieza de agarre han sido de diseño propio en este proyecto. Por tanto el trabajo en conjunto ha sido fundamental para conseguir los objetivos principales de este proyecto. La mayoría de las piezas han sido diseñadas en aluminio, pues es un material resistente a la vez que ligero. Por lo tanto, es una propiedad muy interesante que mejora la maniobrabilidad y reduce el consumo del robot. El robot está formado por tres partes fundamentales. La primera parte está formada por las patas. Cada pata consta de 3 piezas principales y 4 más que forman los cilindros hidráulicos que van conectados al motor para poder mover al robot. La segunda parte está formada por el torso que es la pieza donde descansa el conjunto motor y a su vez donde van unidas las patas mediante arandelas. La tercera parte es el conjunto motor, que está formado por un motor y un depósito. Este motor tiene las prestaciones necesarias para poder generar la fuerza suficiente en los actuadores de las patas y desplazar al robot convenientemente.

3.1 – Diseño en Solid Edge:

En la figura 10 puede verse el montaje completo del robot con todas sus piezas. Las tres partes principales detalladas anteriormente forman el modelo mecánico que nos servirá para realizar cálculos y análisis con el robot. En este proyecto se ha omitido toda la parte electrónica y cableado, centrándose únicamente en los aspectos mecánicos que afecten al funcionamiento del robot. Las piezas Cyllfix y Lcylpist funcionan insertadas una dentro de otra, y forman los actuadores que reciben la fuerza del motor para mover las patas. Cada pata tiene dos actuadores, uno para la rotación de la cadera y otro para la rotación de la rodilla. Estas dos rotaciones suponen dos grados de libertad por cada pata. Hay que añadir un tercer grado de libertad entre la pieza Lowerleg y la pieza apoyo, pues entre ellas está instalado un muelle para mejorar las prestaciones del sistema. Sobre el torso descansa el conjunto motor. Es precisamente el motor del que queremos aislar las vibraciones que produce y por ello es parte importante en este proyecto. Se coloca el motor por la abertura superior y simplemente estará apoyado encima de la parte inferior del torso. Se supone que se atornilla el motor al torso, pero en la realidad se pretende diseñar un aislante entre motor y torso, por lo que esa fijación con tornillos no será efectiva. Esto es posible hacerlo ya que los programas de diseño usados tienen herramientas para facilitar estas uniones, ideal para la realización de los cálculos usados en sucesivos apartados. Para realizar el montaje del conjunto en Solid Edge, se han usado las principales restricciones entre las piezas. Un ejemplo es alinear ejes, que se ha usado en las rodillas y caderas de cada pata, otro ejemplo es coincidir caras que se ha usado entre el torso y el conjunto motor y otro ejemplo es alineación plana, para algunas caras de las piezas como Upperleg y Ulandbod.

La figura 10 muestra el aspecto del robot en Solid Edge. En la imagen puede comprobarse que se han usado 5 piezas para cada pata que son: Ulandbod, Upperleg, Lowerleg, Cylfix y Lcylpist. El apoyo va unido a Lowerleg y puede considerarse una sola pieza. Todas las piezas han sido importadas en formato .igs, y ha sido necesario especificar un material para definir las piezas. En concreto el Aluminio 60-61 T6, que fácilmente se puede asignar en Solid Edge. La imagen de la figura 11 corresponde al detalle del montaje de una pata. Se han usado las relaciones de alineamiento entre las piezas que se mencionaron anteriormente.

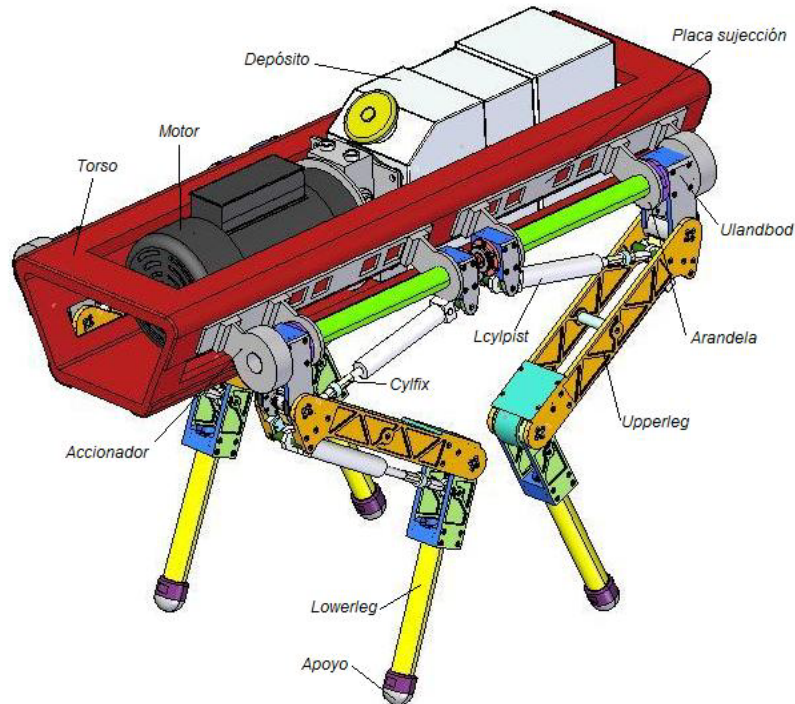


Figura 10. Imagen completa del robot

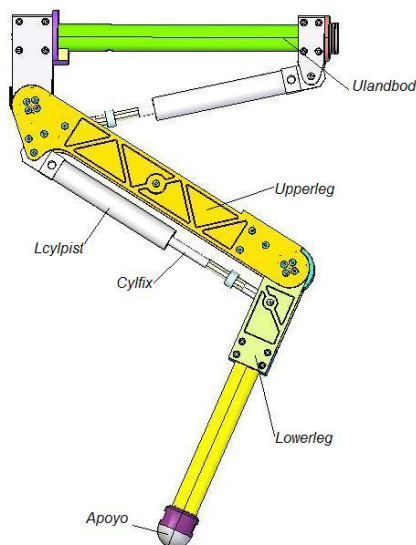


Imagen 11. Detalle del montaje de una pata

En total son 7 piezas usadas en cada pata, dos de ellas repetidas, por lo que se usan 6 piezas distintas. No puede apreciarse el muelle instalado entre el apoyo y Lowerleg porque va en un tubo interior de la pata. El muelle se usa para amortiguar los contactos con el suelo y para evitar la transmisión de vibraciones al resto de la estructura.

La segunda parte importante del cuadrúpedo es el torso. En la figura 10 se ve la colocación del torso y su ensamblaje con el resto de las piezas de la estructura. El torso es parte fundamental del proyecto pues es la principal pieza de estudio para el análisis de las vibraciones de la estructura. Las especificaciones técnicas y acotaciones para la construcción del torso se indican en la tabla 1. Por otra parte, las patas se unen al torso por medio de unas placas y arandelas. Las arandelas se insertan en el eje de Ulandbod y las placas se acoplan a las paredes de la estructura del torso. Estas piezas deberían ir atornilladas en la realidad pero no son necesarias para los resultados de este proyecto. La figura 12 contiene una imagen detallada del montaje de estos elementos. Es importante comentar, que la rotación de las patas en el eje de la pieza Ulandbod no está libre, aunque intuitivamente pueda parecer que es posible rotar una pata lateralmente. La razón es que los análisis en este proyecto se centran en simulaciones en las que no es necesario usar ese grado de libertad, aunque sería posible realizar estudios y análisis en ese supuesto si se decidiera realizar algún proyecto en ese sentido. Para definir completamente la colocación de las placas y arandelas en el torso deben seguirse unas especificaciones técnicas, pues no pueden colocarse sin criterio. De este modo se define la estructura completamente, pues las patas quedarán colocadas en su posición óptima de trabajo para realizar unos movimientos precisos. Las restricciones indicadas se resumen en la tabla 2.

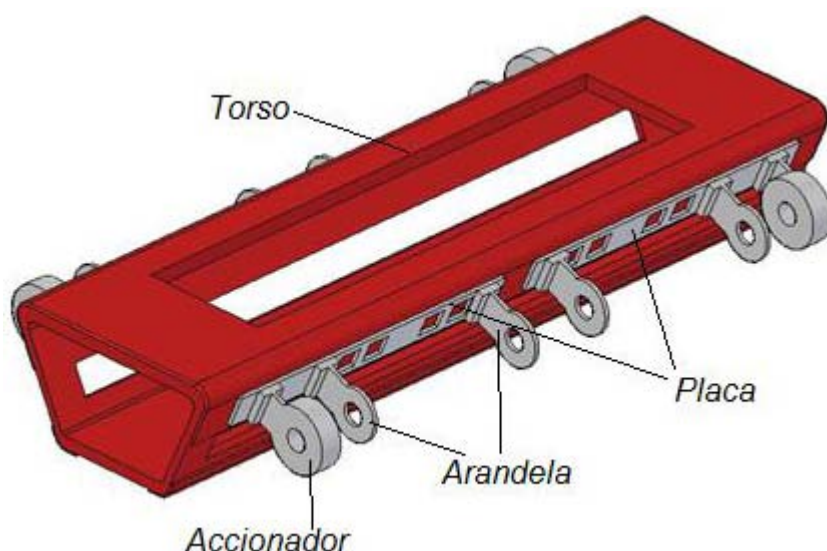


Figura 12. Detalle del montaje del torso, placas y arandelas.

Tabla 1. Dimensiones del torso.

Altura	170 mm
Ancho base superior	340 mm
Ancho base inferior	180 mm
Longitud	1000 mm

Por último para montar completamente el conjunto es necesario definir el conjunto motor. El motor ha sido diseñado a partir de los datos facilitados por un fabricante comercial. Se ha modelado el motor como si fuera de aluminio por su buena resistencia y bajo peso. El motor elegido es “Parker 550 Series Hydraulic Power Units” y sus especificaciones se muestran en la figura 13.

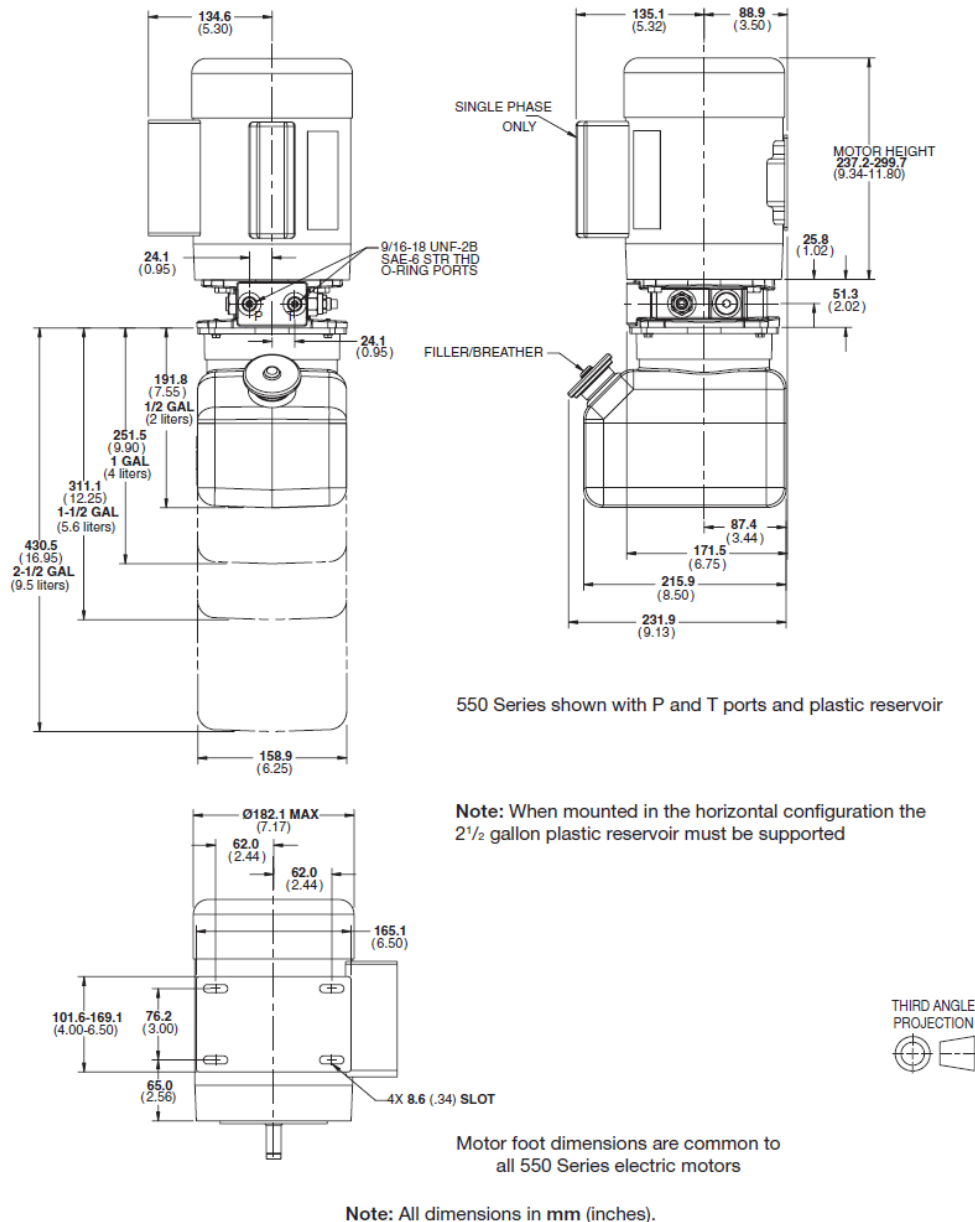


Figura 13. Imagen de los planos del motor Parker, [28].

Tabla 2. Distancias y posiciones de las patas y el torso.

Distancia entre el límite inferior del torso y el eje de las arandelas	82,5 mm
Distancia entre los ejes de las arandelas de lado a lado	414 mm
Distancia entre el eje de las arandelas y la cadera de las patas	80 mm
Distancia entre las caderas de las patas de un lateral	747 mm

- *Motor TY = 2.0 HP*
- *3450 RPM,*
- *Three Phase*
- *Pump Size 07 = 0.07 CIPR*
- *Reservoir 26 = 2.5 Gallon Plastic*
- *Circuit D0 = D03 Pad & Extension Fittings*
- *4-Way Valve 01Y = Closed Center 120 VAC Conduit Connector(s)*
- *Flow Control NN = None Relief*
- *Valve Setting 24 = 2400 psi*

Ahora el sistema está definido completamente. El modelado del sistema en Cad servirá para una futura implementación en Adams lo cual permitirá realizar simulaciones dinámicas precisas y así poder obtener conclusiones sobre los problemas derivados de la vibración del motor.

3.2 – Diseño en Adams:

Una vez se tiene el sistema modelado en Solid Edge, es momento de exportarlo a Adams. En primer lugar hay que especificar una densidad o material con la que trabajar en el modelo. Se modela el sistema con Aluminio 60-61 T6 y es necesario especificar en Adams las propiedades de este material que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del material.

Densidad	2712
Módulo de Young	$6,894757 \cdot 10^{10}$
Coefficiente de Poisson	0,33

El montaje en Adams es distinto del de Solid Edge, pues hay que desplazar y rotar cada pieza individualmente hasta la posición deseada, y después asignar una junta. En general el aspecto que presenta el modelo en Adams es bastante parecido al de Solid Edge, pero difieren algunos conceptos de ensamblaje como la mencionada asignación de juntas y la colocación de las piezas. En función de cómo se oriente y coloque una pieza en el modelo en el que se está trabajando con Adams, la pieza se comportará de una manera u otra. La orientación y posición que posee una pieza cuando se guarda el modelo en Adams es justo la misma que tendrá dicha pieza cuando comiencen las simulaciones, sean del tipo que sean. Una vez colocada la pieza como se desee, se asigna una junta con otra pieza o con el entorno. Las juntas sirven para saber cómo es el movimiento relativo entre dos piezas. Si la junta es un candado, significa que no hay movimiento relativo entre piezas y se mueven todas igual. Si la junta es traslacional, sólo hay desplazamiento en un eje indicado. Si la junta es rotacional, sólo hay rotación en un eje indicado. Se explicará cómo relacionar unas piezas con otras. La figura 14 muestra una imagen del diseño completo del cuadrúpedo en Adams. En principio los elementos que lo forman son los mismos que en Solid Edge pero con algunas diferencias. En Adams no se usan relaciones de conjunto para unir piezas (alineal ejes o caras), sino que se usan juntas que permiten determinados movimientos (grados de libertad). Los muelles de las patas son notoriamente visibles, pues en Adams son elementos activos que intervienen en la simulación y tienen una fácil implementación. Los colores de las piezas varían de un programa a otro, pero ello es debido a la manera de importar archivos de cada programa.

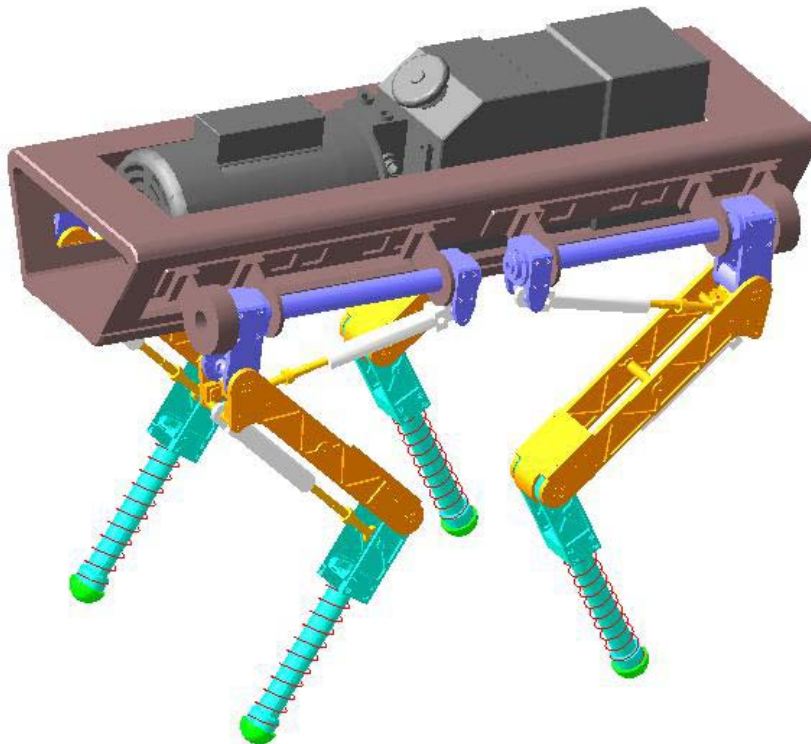


Figura 14. Modelado del sistema en Adams

Puede comprobarse en la figura 14 que la similitud entre ambas formas de modelado es muy grande, pero la realidad es que los resultados que se obtienen en Adams son bastante más interesantes gracias a la posibilidad de poder realizar simulaciones dinámicas. El esquema de montaje es el mismo: tres partes principales que son las patas, el torso y el conjunto motor. Para montar una sola pata es necesario asignar 9 juntas una vez que se han colocado las piezas en su posición de trabajo.

El gráfico de la figura 15 muestra el modelado de una pata con sus juntas. La junta traslacional está colocada entre Lowerleg y el apoyo. Estas dos piezas se mueven como si fuera una, pero se permite un movimiento relativo entre ellas de traslación a lo largo del eje vertical de Lowerleg, es decir, el apoyo se puede trasladar a lo largo de ese eje. Una vez introducido el muelle, esa traslación queda limitada. En la junta basta especificar dos puntos para indicar la dirección del desplazamiento. En el muelle el punto inferior está anclado al apoyo y el superior a Lowerleg. El movimiento relativo entre Lowerleg y Upperleg es de rotación en el eje perpendicular al plano del papel. La junta escogida es de tipo rotacional y permite la rotación de la manera indicada en el gráfico. Al introducir juntas entre dos piezas, la que se elige en primer lugar es la que se mueve respecto de la segunda. En el montaje de este conjunto hay que tener claro qué piezas se mueven respecto de otras para elegir las según este criterio. La junta utilizada es de tipo cilíndrica, y permite el movimiento de traslación y rotación. Al usar esta junta, las piezas rotan y se desplazan a lo largo del eje longitudinal que las une. En el gráfico 15, la junta esférica mostrada en rojo en la rodilla (la misma que en Ulandbod) con la que se une Lcylpist a Lowerleg, permite todas las rotaciones posibles respecto del punto elegido. Se elige como primera pieza (la que rotará) a Lcylpist (naranja). Al usar una junta rotacional en Cylfix sobre Upperleg, se consigue que Cylfix rote sobre Upperleg en el eje indicado, impidiendo que Cylfix se desplace o rote en otros ejes, pero sí tendrá traslación relativa respecto de Lcylpist.

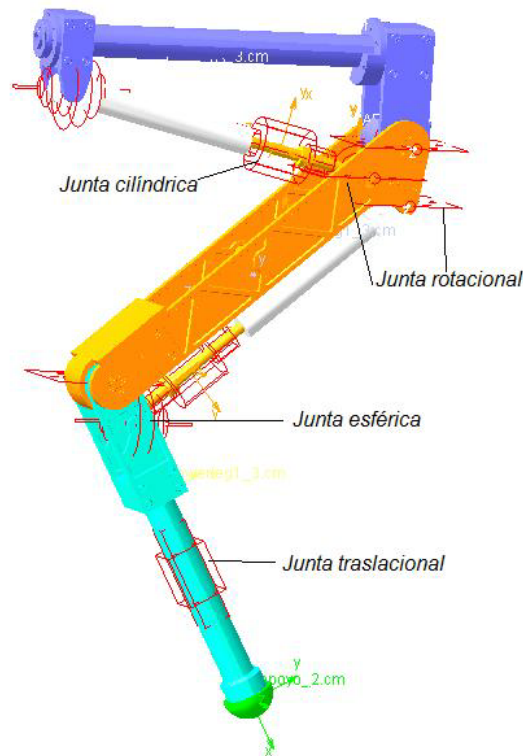
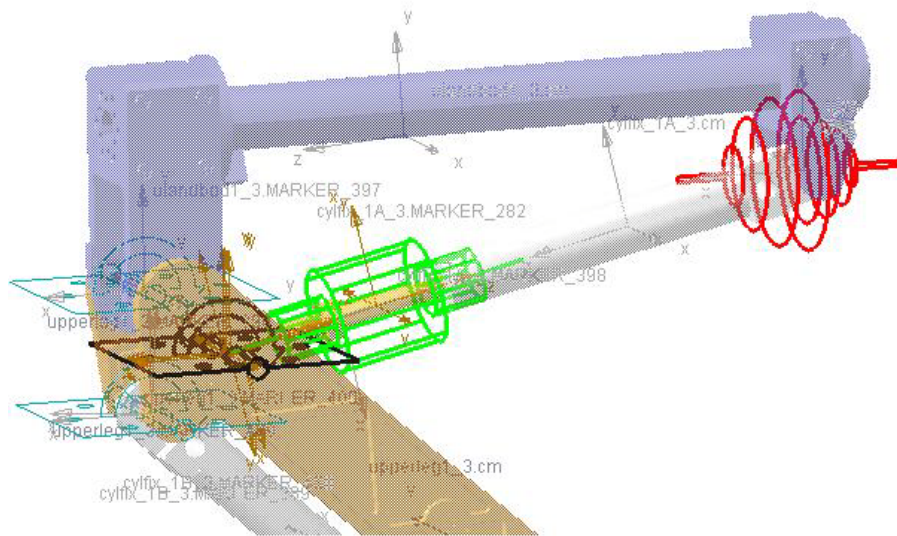


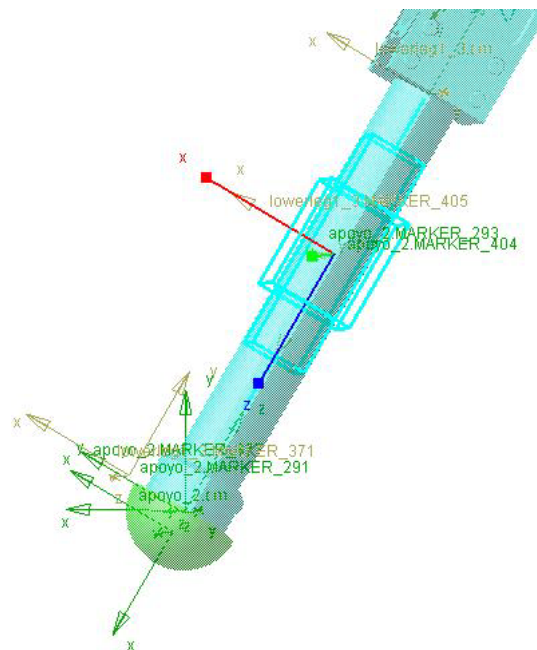
Figura 15. Imagen de una pata con juntas

Además Lcylpist está unido a Lowerleg con una junta esférica que libera todas las rotaciones, pero la junta cilíndrica que se puso entre Cyllfix y Lcylpist, impide que Lcylpist rote. Por eso la junta esférica en el fondo tiene una sola rotación libre que hace que Lcylpist rote sobre Lowerleg en el eje Z, es decir como si la junta esférica fuese en realidad una junta rotacional. El motivo de estas uniones tan complicadas es evitar redundancias que originan errores y cálculos innecesarios en Adams. Las redundancias indican que hay más ecuaciones de las necesarias porque según qué tipo de juntas se usen, estamos restringiendo o añadiendo más grados de libertad al sistema. En definitiva queda demostrado que la unión de Cyllfix y Lcylpist supone una traslación relativa entre ellas, y rotaciones sobre sus puntos de apoyo, que es el funcionamiento lógico y real de estas piezas en el cuadrúpedo. El mismo criterio se usa para unir Cyllfix y Lcylpist a Ulandbod y Upperleg. Con esto queda explicado cómo sería el montaje de una pata y evidentemente las demás se montan igual, pues poseen las mismas propiedades. Se recuerda que los grados de libertad por pata son 3, aspecto muy importante a la hora de arrancar simulaciones en Adams.

Las imágenes de la figura 16 muestran ampliaciones detalladas del montaje de una pata con sus juntas. En la parte superior destacan tres juntas rotacionales que permiten rotaciones entre Ulandbod y Lowerleg, entre Ulandbod y Lcylpist y entre Lowerleg y Cyllfix. En verde se resalta la junta cilíndrica entre Cyllfix y Lcylpist que libera traslación y rotación en el eje longitudinal que une ambas piezas. En rojo se pone una junta esférica que libera todas las posibles rotaciones de Cyllfix. En negro se observa una junta rotacional que une Upperleg con Lcylpist y que impide todo movimiento menos la rotación en el eje perpendicular al plano de las piezas. La junta rotacional restringe las rotaciones de la junta esférica por la acción de la junta cilíndrica y así se consigue una traslación relativa y un giro en el plano perpendicular al de las piezas.



(a)



(b)

Figura 16. Ampliación de una pata con juntas: a) parte superior, b) parte inferior

La ampliación de la parte inferior de la pata muestra la colocación de la junta traslacional. Se comprueba que sigue la dirección del eje que forma Lowerleg. Por otra parte también se distinguen unos ejes de coordenadas cuando se insertan juntas. En general el programa asigna unos ejes de coordenadas globales a todo el modelo cuando se empieza a modelar. Además cuando se importa una pieza al modelo, el programa asigna unos ejes de coordenadas locales a cada pieza. Por último si se aplica una junta entre dos piezas, Adams asigna unos ejes de coordenadas entre los cuerpos para orientar el tipo de movimiento local que posee cada junta o articulación. Otro elemento importante que Adams asigna de manera

automática a las piezas es el marcador o “Marker”. Se usa como punto de referencia y sobre ellos pueden ser aplicadas las fuerzas. Por ejemplo, la gravedad de los cuerpos actúa sobre el Marker centro de masas de cada pieza.

Una vez modeladas las patas en Adams, la siguiente parte importante es el torso. El torso en Adams está diseñado con las arandelas y sujeciones de las patas que se diseñaron en Solid Edge. No se han separado estos elementos porque se proporcionan los datos sobre sus propiedades físicas de todo junto y no por separado. Como puede apreciarse en la figura 17, las patas se insertan en las arandelas del torso y se bloquean, es decir, la junta que gobierna estas uniones es un candado o junta fija e impide toda traslación y rotación, pues las patas no tienen movimiento respecto al torso, se mueven solidarias con él. El montaje es muy similar al realizado en Solid Edge.

La tercera parte importante del montaje en Adams es el conjunto motor y su anclaje al torso. Se importa el conjunto en bloque y no por piezas sueltas. Será necesario asignar las propiedades físicas globales al conjunto y no a cada pieza. Para fijar el conjunto motor al torso se coloca una junta candado que bloquea todos los desplazamientos y rotaciones entre el torso y el conjunto motor, como puede apreciarse en la imagen de la figura 17. Todas las juntas que impliquen un desplazamiento relativo (aquellas que no son candados), llevan por defecto un coeficiente de rozamiento, para hacer la simulación lo más realista posible. En este proyecto no se han variado estos valores, que por defecto el Adams asigna para el coeficiente de rozamiento estático un valor de 0,5 y para el coeficiente de rozamiento dinámico un valor de 0,3. Cuando se importa una pieza en Adams, que no se ha diseñado con el propio programa, es necesario asignarle una masa, pues si no en la simulación dinámica la fuerza de la gravedad no actúa sobre los cuerpos. En Adams la masa se puede asignar mediante la densidad y geometría, geometría y tipo de material o con la masa y momentos de inercia. Usaremos masa y momentos de inercia para definir la pieza completamente.

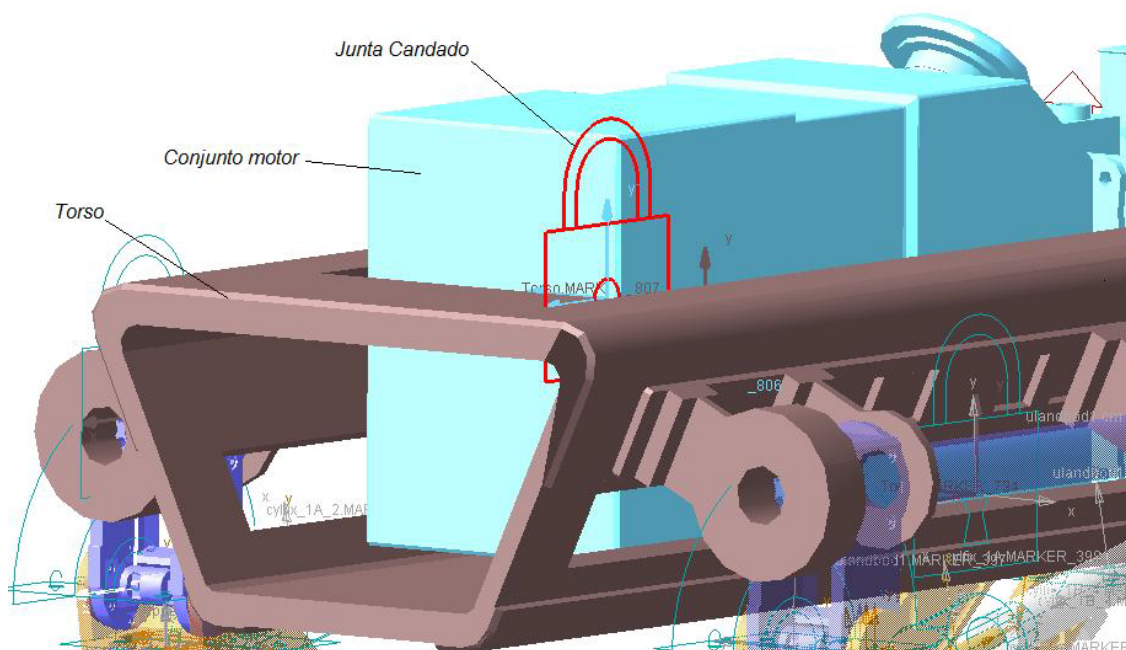


Figura 17. Ampliación de la junta candado en el motor

La tabla 4 contiene las propiedades físicas necesarias para definir las piezas dinámicamente. Es suficiente con definir la masa y los momentos de inercia respecto al centro de gravedad de cada pieza.

Tabla 4. Propiedades físicas de las piezas.

Propiedades de Lowerleg		
<i>Masa= 0.85411651</i>		
<i>lxx = 1.0502113E-002</i>	<i>lxy = 1.7759037E-007</i>	<i>lxz = -1.3041188E-005</i>
<i>lyx = 1.7759037E-007</i>	<i>lyy = 1.0733969E-002</i>	<i>lyz = -5.1585514E-005</i>
<i>lzx = -1.3041188E-005</i>	<i>lzy = -5.1585514E-005</i>	<i>lzz = 4.6821074E-004</i>
Propiedades del apoyo		
<i>Masa= 0.1068986807</i>		
<i>lxx = 1.7212535483E-004</i>	-	-
-	<i>lyy = 1.7212309788E-004</i>	-
-	-	<i>lzz = 1.8465759884E-005</i>
Propiedades de Upperleg		
<i>Masa= 1.0130695</i>		
<i>lxx = 1.8075706E-002</i>	<i>lxy = -1.2822029E-003</i>	<i>lxz = 5.9436538E-008</i>
<i>lyx = -1.2822029E-003</i>	<i>lyy = 1.2016699E-003</i>	<i>lyz = 8.1948195E-008</i>
<i>lzx = 5.9436538E-008</i>	<i>lzy = 8.1948195E-008</i>	<i>lzz = 1.7588E-002</i>
Propiedades de Ulandbod		
<i>Masa= 1.5535176</i>		
<i>lxx = 3.3241987E-002</i>	<i>lxy = -2.9041581E-006</i>	<i>lxz = -2.7387665E-003</i>
<i>lyx = -2.9041581E-006</i>	<i>lyy = 3.4329479E-002</i>	<i>lyz = -7.183834E-005</i>
<i>lzx = -2.7387665E-003</i>	<i>lzy = -7.183834E-005</i>	<i>lzz = 2.1589889E-003</i>
Propiedades de Cylfix		
<i>Masa= 0.69301134</i>		
<i>lxx = 2.0639645E-003</i>	-	-
-	<i>lyy = 2.060186E-003</i>	-
-	-	<i>lzz = 7.0006735E-005</i>
Propiedades de Lcylpist		
<i>Masa= 0.14272515</i>		
<i>lxx = 2.89719E-006</i>	-	-
-	<i>lyy = 4.874413E-004</i>	<i>lyz = -2.857457E-011</i>
-	<i>lzy = -2.857457E-011</i>	<i>lzz = 4.8820681E-004</i>

Propiedades del Torso		
<i>Masa</i> = 47.208276		
<i>Ixx</i> = 5.8140297	<i>Ixy</i> = -2.369802E-002	<i>Ixz</i> = 5.0413879E-002
<i>Iyx</i> = -2.369802E-002	<i>Iyy</i> = 6.2289316	<i>Iyz</i> = -2.4413983E-002
<i>Izx</i> = 5.0413879E-002	<i>Izy</i> = -2.4413983E-002	<i>Izz</i> = 0.99161275
Propiedades del Motor		
<i>Masa</i> = 20.216311		
<i>Ixx</i> = 8.8969223E-002	<i>Ixy</i> = 4.4749026E-004	<i>Ixz</i> = -2.4586589E-003
<i>Iyx</i> = 4.4749026E-004	<i>Iyy</i> = 0.46072324	<i>Iyz</i> = -1.2935351E-003
<i>Izx</i> = -2.4586589E-003	<i>Izy</i> = -1.2935351E-003	<i>Izz</i> = 0.46638008

El cuadrúpedo está completamente modelado en Adams. Para animar las patas del robot y poder simular es necesario modelar el entorno en el que se desplazará el robot. Por defecto en los modelos en Adams, las piezas flotan en el espacio, pero cualquier punto del espacio puede ser usado para interactuar con las piezas, por ejemplo, colocando una junta en una pieza y en el espacio. Esto en la realidad no puede suceder, pero Adams permite realizar estas operaciones. Todos los modelos en Adams, llevan activada una fuerza de gravedad en todos los puntos del espacio. Es posible desactivarla pero aquí se va a usar la fuerza por defecto, orientada según el eje y en sentido negativo, y cuyo valor es: 9,80665 . Por tanto si ahora se arrancase una simulación, las piezas caerían al infinito según el eje Y, por la acción de esta fuerza de gravedad en el modelo. Es necesario modelar un suelo sobre el que se desplazará este cuadrúpedo. Un simple paralelepípedo sirve para este cometido. No se facilitan datos ni propiedades de esta pieza, pues no actúa en las simulaciones salvo para soportar al cuadrúpedo. El suelo está anclado al espacio por medio de un candado que bloquea cualquiera de sus movimientos. En la figura 18 hay una imagen con el suelo en color azul. Para relacionar el suelo con el cuadrúpedo no se usan juntas, sino que se utilizan contactos entre elementos, concretamente uno por cada apoyo con el suelo. En este contacto se especifica que la unión sean de tipo sólido – sólido, que la reacción con el suelo sea impacto normal a su superficie, y por defecto Adams asigna unos valores de penetración, rigidez y amortiguación que no se cambian. Se asigna una fuerza de rozamiento para este contacto con un coeficiente de rozamiento estático de 0,7 y dinámico de 0,4 intentado parecerse a la fricción en una calzada normal. Los contactos pueden verse en la figura 18. Las líneas blancas representan el contacto existente entre el suelo y las patas.

El modelo está completo. Para un correcto funcionamiento de las simulaciones es necesario hacer una verificación para asegurarse de no tener ecuaciones de sobra (redundancias) y conocer los grados de libertad (gdl). En la imagen de la figura 19 puede apreciarse la comprobación que Adams realiza sobre el sistema. El resultado es que todo el sistema está bien modelado y existen 11 grados de libertad. Adams considera 11 grados de libertad, porque los ha calculado por separado. Cada cuerpo posee 6 grados de libertad (3 rotaciones + 3 traslaciones). En el modelo hay un suelo fijo al espacio (0 gdl) y el cuadrúpedo que posee 6 gdl. El propio cuadrúpedo tiene ciertos movimientos relativos entre sus piezas. Anteriormente se demostró que cada pata tiene 3 grados de libertad, una rotación en la cadera, una rotación en la rodilla y una traslación en el apoyo. Para dotar de movimiento al cuadrúpedo será necesario instalar un motor en la rodilla que gobierne esa rotación y otro en la cadera para la otra rotación.

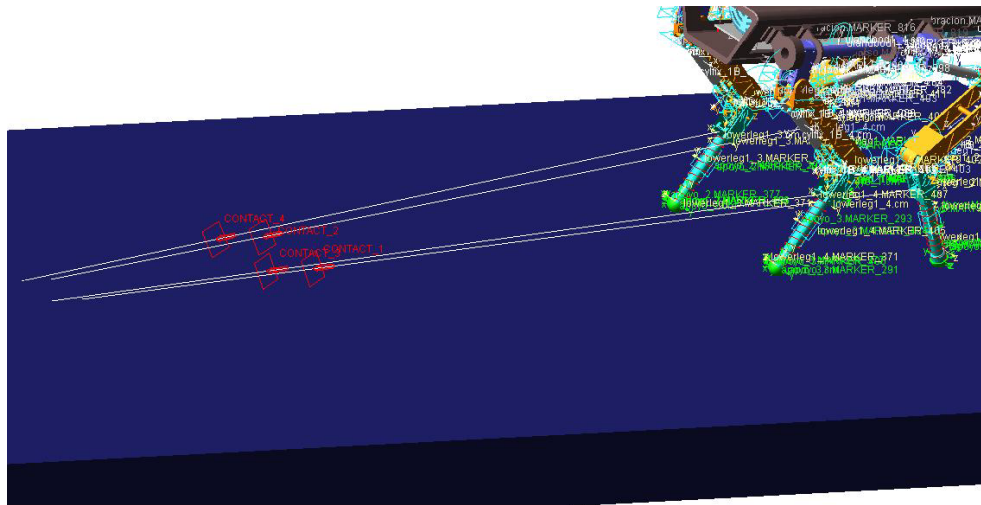


Figura 18. Imagen del suelo y los contactos

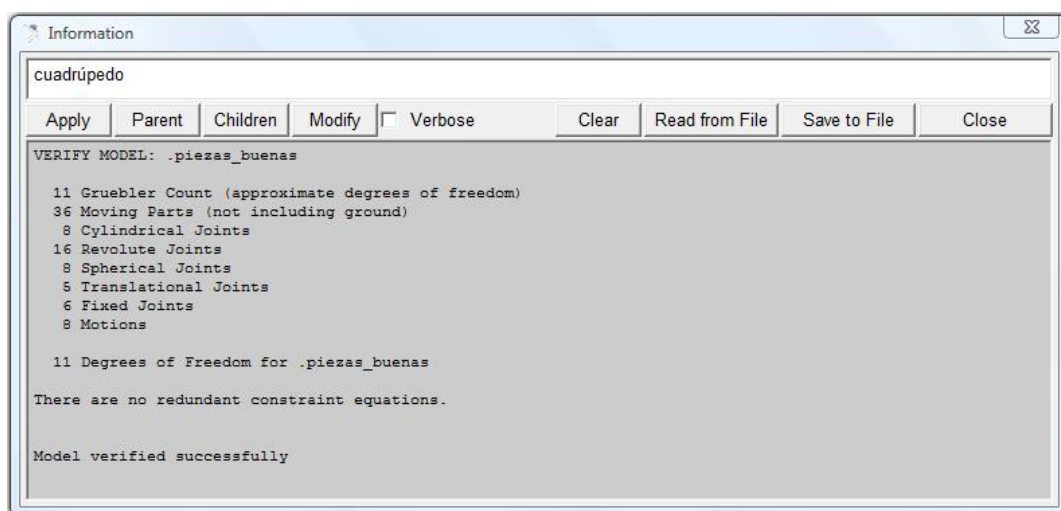


Figura 19. Imagen de la verificación del sistema

Estos motores sirven para animar los elementos en Adams, no son motores como tal, y serán detallados más adelante. El grado de libertad correspondiente al apoyo queda gobernado por el muelle por lo que no es necesario motor. Ese es el motivo por el que cada pata tiene un solo grado de libertad, pues al insertar motores en sus rotaciones libres, éstas pasan de ser libres a ser controladas. Ahora hay 6 gdl del conjunto + 1 gdl por cada pata, lo que hace un total de 10 gdl. El último corresponde a la traslación entre el torso y el conjunto motor. Para ello usaremos una junta traslacional en vez del candado actual. Este cambio es aplicado en posteriores apartados y será convenientemente indicado. El motivo es que al diseñar el aislante hay que liberar la traslación vertical entre torso y motor. Es necesario indicar que los muelles que están instalados en cada pata no restringen un grado de libertad como pasa con los motores en las rotaciones. Los muelles simplemente reducen la capacidad de traslación entre esas piezas pero nunca gobiernan los movimientos como en el caso de las rotaciones. El muelle que se ha implementado en esta simulación tiene un coeficiente de

rigidez de 1500 y un coeficiente de amortiguación de 800 . Estos valores vienen impuestos por IIT y no han sido objeto de estudio en los resultados de este proyecto. La figura 20 muestra una ampliación de la colocación de los muelles.

El último paso para completar la fase de modelado es la colocación de motores en aquellos puntos del sistema que se consideren óptimos para dotar al cuadrúpedo de movimiento. Como se ha comentado anteriormente, en Adams los motores se usan en las 4 rodillas y en las 4 caderas, por lo tanto habrá que controlar 8 entradas en cada animación. Para dar movimiento a las patas, es necesario asignar a los motores unas determinadas órdenes. Como puede comprobarse en la imagen de la figura 21, los motores se representan con una semicircunferencia indicando el sentido positivo de la rotación. Es necesario aplicar un motor en una junta rotacional.

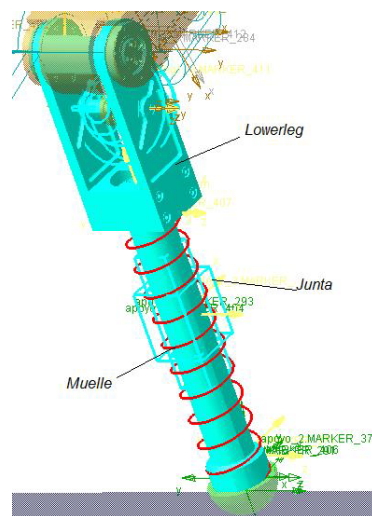


Figura 20. Ampliación del muelle-amortiguador de las patas

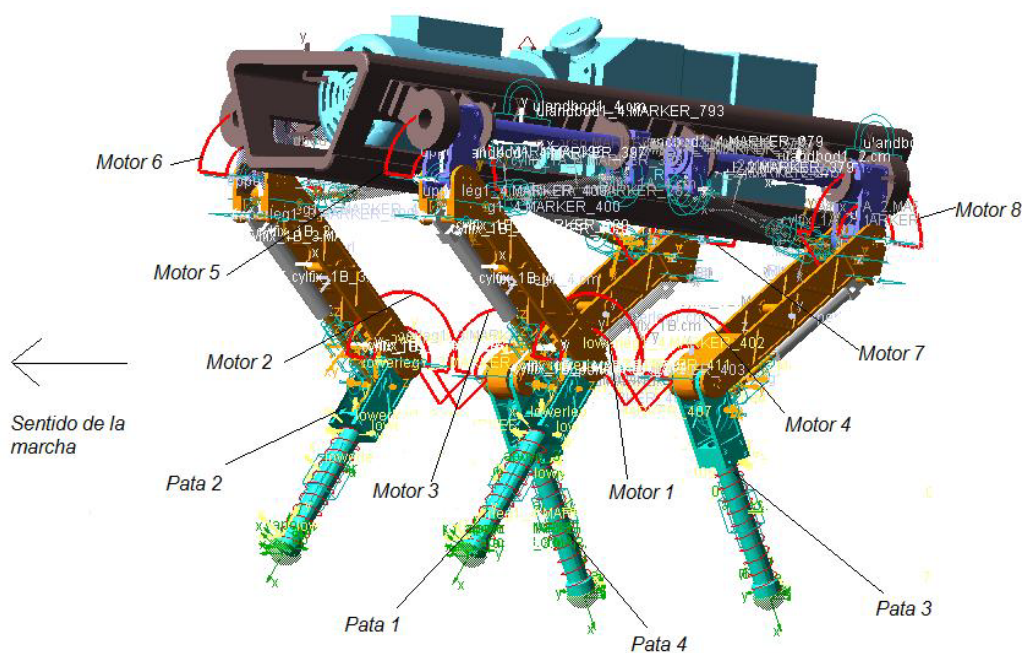


Figura 21. Referencia a motores y patas

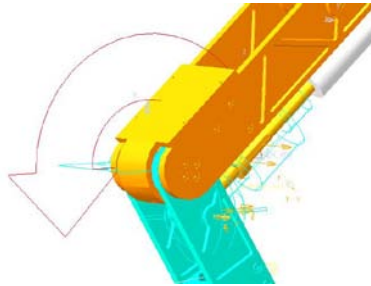


Figura 22. Ampliación de la colocación de un motor

La figura 21 muestra la colocación de los motores y su numeración, así como de las patas. Las patas 1 y 2 son las delanteras y las 3 y 4 las traseras. Las patas impares están en el lado izquierdo y las pares en el derecho. Un motor colocado en la rodilla de una pata, hace que rote Lowerleg según la orden de movimiento que reciba. Estas órdenes pueden ser funciones, constantes, funciones que dependen del tiempo o series de Fourier. Para estos motores se van a usar curvas a partir de valores de posición a lo largo del tiempo. Con los datos de esas tablas Adams puede crear curvas interpolando valores. Si los valores de esas curvas corresponden al ángulo que gira el motor en relación al tiempo, Adams puede interpretar fácilmente esas tablas para generar movimiento. Se entiende que es necesaria una cierta coordinación entre las órdenes que figuran en las tablas para generar un movimiento realista, que el cuadrúpedo pueda realizar en la realidad.

La figura 22 muestra una ampliación de la posición de los motores en una rodilla. Intuitivamente eje y sentido positivo de rotación viene definido por el dibujo del motor. En las tablas de animación basta introducir valores de ángulos para hacer girar las patas, teniendo en cuenta el criterio de signos mencionado. El modelado y diseño del cuadrúpedo y su entorno está acabado y listo para comenzar las simulaciones.

Capítulo 4

Simulación

Las simulaciones dinámicas del robot “HyQ” en un contexto Adams han sido desarrolladas para investigar la capacidad de operación y más en general la factibilidad de la estructura propuesta en cuestión. Los modelos Adams de “HyQ” han sido elaborados introduciendo cada componente con sus características determinadas, en términos de material, masa, forma y diseño mecánico. Casi todos los componentes de “HyQ” han sido considerados como hechos de aleación de aluminio. Componentes, tales como los PLC’s propuestos para sistemas de control, correas, poleas y trenes de engranaje del mecanismo de transmisión, ha sido considerado como hecho de plástico. Una dinámica apropiada para el robot andando, corriendo y saltando requiere una fricción alta entre el suelo y los pies. Para la simulación Adams, los coeficientes estáticos y dinámicos de fricción entre los pies del “HyQ” y el suelo han sido considerados como los valores medios de fricción para el contacto entre goma y cemento. En particular, los coeficientes elegidos han sido iguales a 0.7 para el coeficiente estático y 0.5 para el dinámico, en concordancia con los valores sugeridos en análisis previos. Los efectos de la fricción han sido considerados también para las articulaciones de “HyQ” durante la simulación. Los coeficientes de las articulaciones de “HyQ” elegidos han sido igual a 0.5 para el estático e igual a 0.3 para el dinámico. Estos coeficientes son los coeficientes por defecto de fricciones entre las juntas de revolución en el menú contextual de Adams, [24]. El integrador es un algoritmo que resuelve las diferentes ecuaciones de un problema dinámico en un intervalo de tiempo durante una simulación. El integrador usado para la simulación de “HyQ” ha sido el GSTIFF, [20]. GSTIFF es el integrador por defecto en contexto Adams, pues proporciona buenas soluciones para simulaciones de modelos duros, tensos y rígidos. El integrador GSTIFF usa una fórmula de diferenciación hacia atrás (o reversible), para integrar ecuaciones algebraicas y diferenciales. Además, asume un paso de tiempo fijo que se traduce en coeficientes fijos para predicción de errores. El intervalo de tiempo 0.01 (100 intervalos en un segundo) ha sido seleccionado después de varios intentos para desarrollar la simulación dinámica de “HyQ”, con el objetivo de obtener resultados numéricos apropiados con esfuerzos computacionalmente bajos. Existen tres tipos de sistema:

- Sistema “ideal”, cuando no existen fuerzas excitadoras que causen vibraciones, ni elementos aislantes que absorban las mismas.
- Sistema “con vibraciones”, se refiere al caso en el que el cuadrúpedo se ve sometido a la actuación simultánea de dos fuerzas perpendiculares y periódicas de la forma,
- Sistema “aislado”, se trata del caso en el que se ha instalado el sistema anti-vibraciones con las fuerzas excitadoras funcionando.

4.1 – Simulación del cuadrúpedo caminando:

La primera simulación es caminando. Se define caminando al movimiento en el que una pata está en el aire avanzando y las otras en el suelo desplazan al cuadrúpedo. Ha sido muy útil fijarse en la naturaleza para realizar la animación del cuadrúpedo caminando. El tiempo de simulación en este caso es de 5,5 segundos. En la figura 23 contiene un gráfico que muestra al cuadrúpedo caminando (una de las patas en el aire) en el sentido indicado. Este es el esquema: una pata delantera se levanta y avanza, las otras tres desplazan al cuadrúpedo. Después se levanta la pata trasera contraria a la primera y avanza, las otras tres desplazan al cuadrúpedo. El siguiente paso es con la otra pata delantera y por último la otra pata trasera. Este es el ciclo usado para dar valores a los motores. Como las patas traseras hacen un movimiento muy parecido (los valores de los ángulos son muy parecidos) pero desfasados en el tiempo, sólo se muestran gráficos de los motores de una de las patas traseras. Lo mismo ocurre con las patas delanteras. Anteriormente se ha explicado el uso de las curvas de posición a lo largo del tiempo en los motores para la animación y movimiento de las patas. Para la creación de estas curvas se introduce el valor del tiempo de simulación deseado y el valor del ángulo que se quiere que tenga una pata en ese determinado momento. En el fondo se tiene que los valores temporales se colocan en el eje X y los valores de los ángulos en el eje Y, y a partir de esos datos Adams interpola esos valores para generar curvas. Esas curvas representan el movimiento que describe la pieza sobre la que se ha colocado un motor. Basta asignar a cada motor la curva con los datos deseados. La base de tiempos en el eje X es algo peculiar, pues no usa un sistema sexagesimal ni decimal. Aproximadamente el valor $X=17$ corresponde a 0,3 segundos de simulación. La figura 24 muestra las curvas de movimiento de las patas 3 y 4, realizadas a partir de los datos de posición en función del tiempo. En la gráfica de figura 24 (a), se muestra la curva de movimiento para el motor 4 que corresponde con la rodilla trasera izquierda, es decir de la pata 3. Los valores de la curva de movimiento correspondiente a la rodilla trasera derecha son muy parecidos por lo que se considera representada en la misma gráfica que la rodilla trasera izquierda. Para ser exactos, el desfase entre los movimientos de las patas traseras es de 1,1 segundo siendo los valores de los ángulos girados muy parecidos. Con la curva de movimiento del motor 7 queda definido el movimiento de las caderas traseras. La figura 25 contiene gráficos de las entradas para el movimiento de las patas delanteras (1 y 2). El gráfico 25 (a) muestra la curva de movimiento de la rodilla delantera derecha, que es muy parecido al movimiento de la rodilla delantera izquierda pero desfasado 1,1 segundos. El gráfico 25 (b) muestra la curva de movimiento de la cadera delantera derecha, muy similar a la cadera delantera izquierda con el mismo desfase. Por tanto estas entradas son suficientes para los movimientos de las patas delanteras. En todos los gráficos de movimiento de los motores del cuadrúpedo, se puede apreciar cierta periodicidad. La idea es crear un patrón estable de movimiento para generar una simulación.

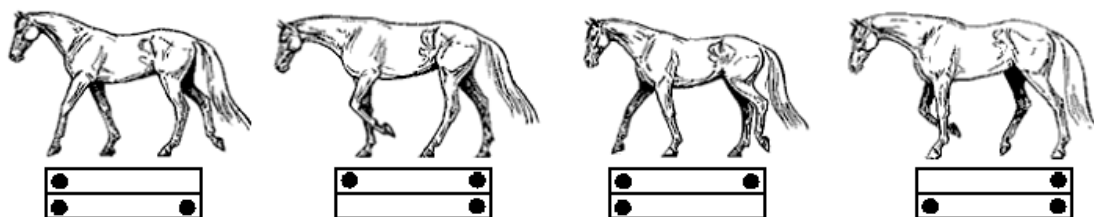
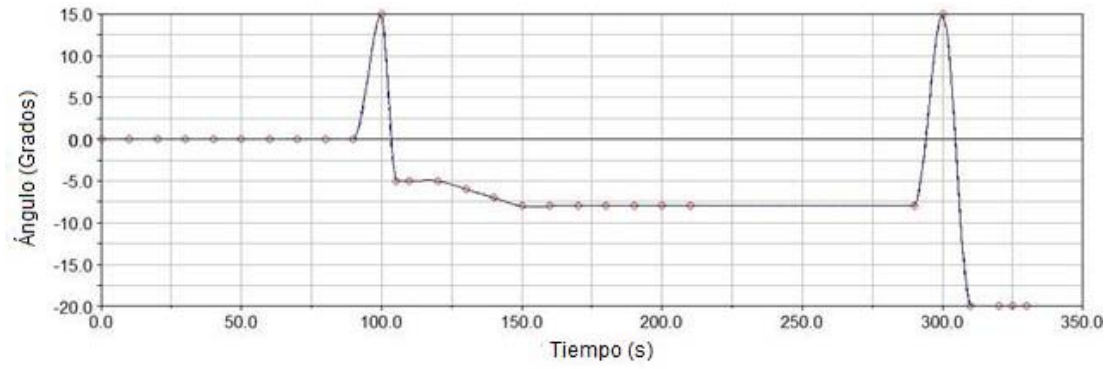
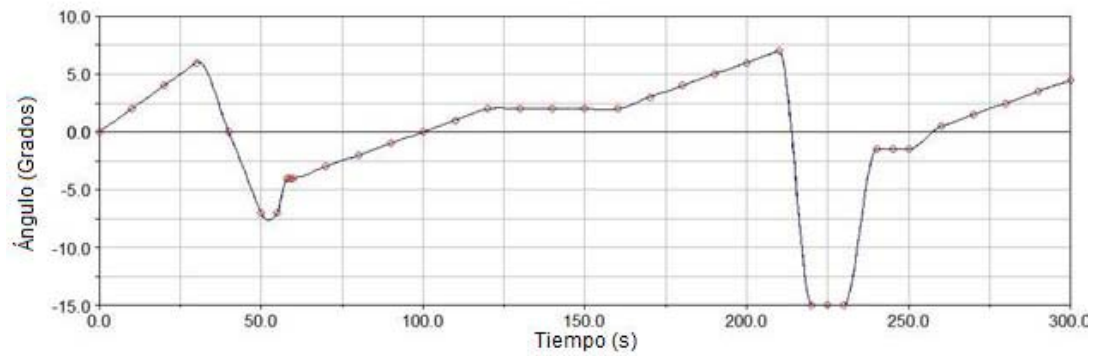


Figura 23. Ejemplo del movimiento de un cuadrúpedo caminando

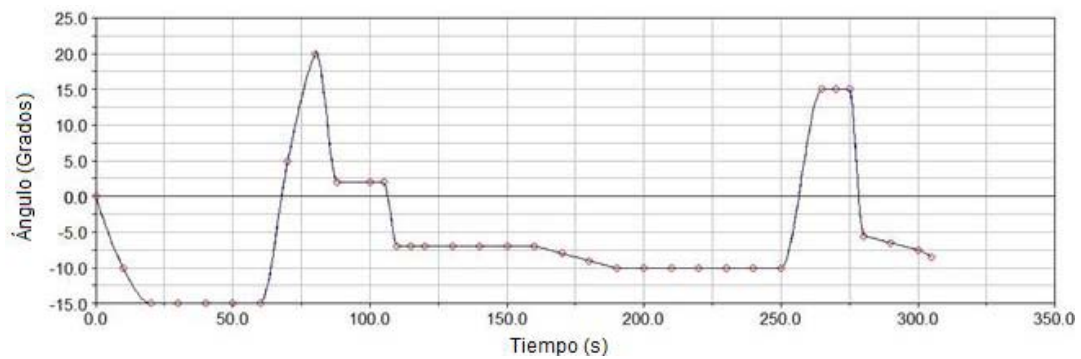


(a)

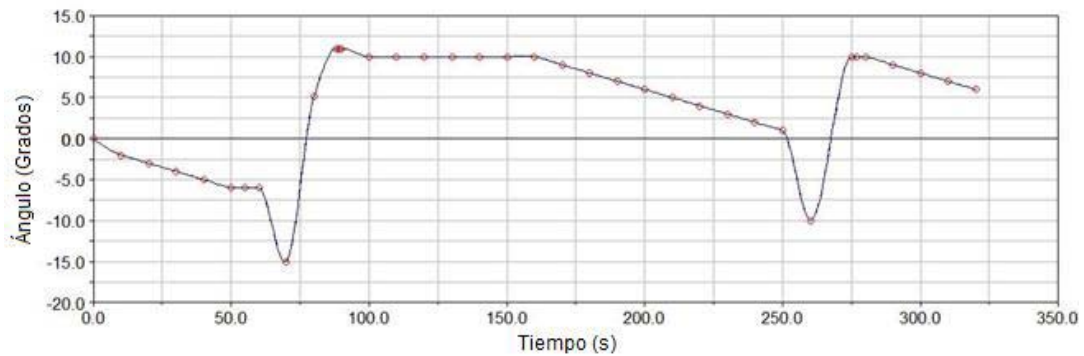


(b)

Figura 24. Entradas para las patas 3 y 4: (a) posición motor 4, (b) posición motor 7



(a)



(b)

Figura 25. Entradas para las patas 1 y 2: (a) posición motor 2, (b) posición motor 6

En principio basta con repetir estos valores, o valores próximos, para alargar la simulación, pero en este caso se ha considerado suficiente realizar dos ciclos para completar la simulación y poder estudiar los movimientos del cuadrúpedo. Por otra parte es interesante conseguir que los movimientos se repitan cíclicamente en el tiempo, desde un punto de vista de análisis de vibraciones generados por el movimiento del cuadrúpedo.

4.2 – Simulación del cuadrúpedo en carrera:

La siguiente simulación es la carrera. Se define el movimiento de carrera cuando, para desplazarse, el cuadrúpedo levanta dos patas en diagonal, las avanza y las baja, mientras que las patas de la otra diagonal, desplazan al cuadrúpedo. La colocación de los motores es igual que en el caso de la simulación anterior. El tiempo de simulación en este caso es de 1.3 segundos y se considera suficiente para mostrar resultados relevantes en los movimientos del robot. La figura 26 contiene un gráfico que muestra al cuadrúpedo corriendo (dos patas en el aire) en el sentido indicado. Este es el esquema: la pata delantera derecha y la trasera izquierda se levantan, las otras dos desplazan al cuadrúpedo. Después las patas que están en el aire avanzan mientras que las otras dos siguen desplazándose. Cuando las patas han avanzado, descienden hasta contactar con el suelo y empezar a desplazarse, mientras que las otras dos patas que antes se desplazaban comienzan a levantarse para empezar con los mismos movimientos descritos. Al igual que en la anterior simulación, las patas traseras hacen un movimiento muy parecido (los valores de los ángulos son muy parecidos) pero desfasados en el tiempo, sólo se muestran gráficos de los motores de una de las patas traseras. Lo mismo ocurre con las patas delanteras. En la gráfica de la figura 27 (a) se muestra la curva de movimiento para el motor 3, que corresponde con la rodilla trasera derecha, es decir la pata 4. Los valores de la curva de movimiento correspondiente a la rodilla trasera izquierda son muy parecidos por lo que se considera representada en la misma gráfica que la rodilla trasera derecha. El desfase entre los movimientos de las patas es de aproximadamente 0,3 segundos y los valores de los ángulos introducidos en las curvas de movimiento son muy parecidos si comparamos las dos rodillas traseras. Lo mismo ocurre con las rodillas delanteras y las caderas delanteras y traseras. En la gráfica de la figura 27 (b) queda definido el movimiento de las caderas traseras aunque se represente sólo la curva del motor 7. La figura 28 contiene gráficas de las entradas para el movimiento de las patas delanteras (1 y 2). La gráfica 28 (a) muestra la curva de movimiento de la rodilla delantera izquierda, motor 1, que es muy parecida al movimiento de la rodilla delantera derecha pero desfasada 0,3 segundos. El gráfico 28 (b) muestra la curva de movimiento de la cadera delantera izquierda, motor 5, muy similar a la cadera delantera derecha con el mismo desfase. Por tanto estas entradas son suficientes para los movimientos de las patas delanteras.

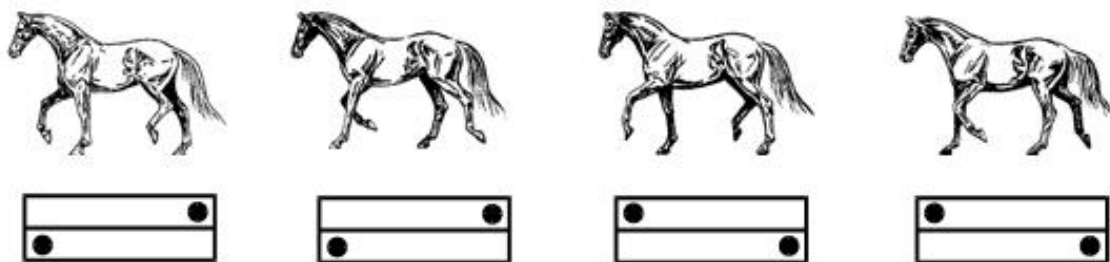
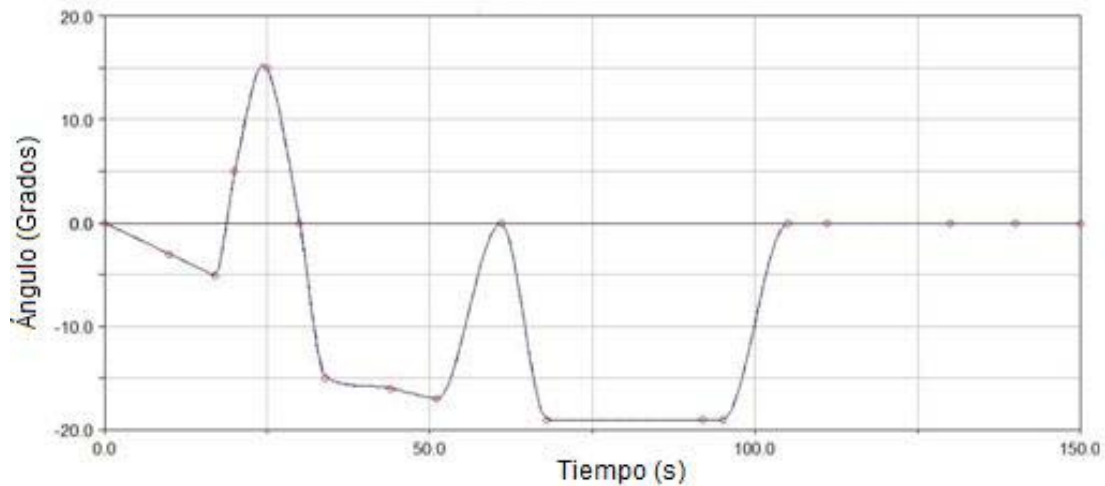
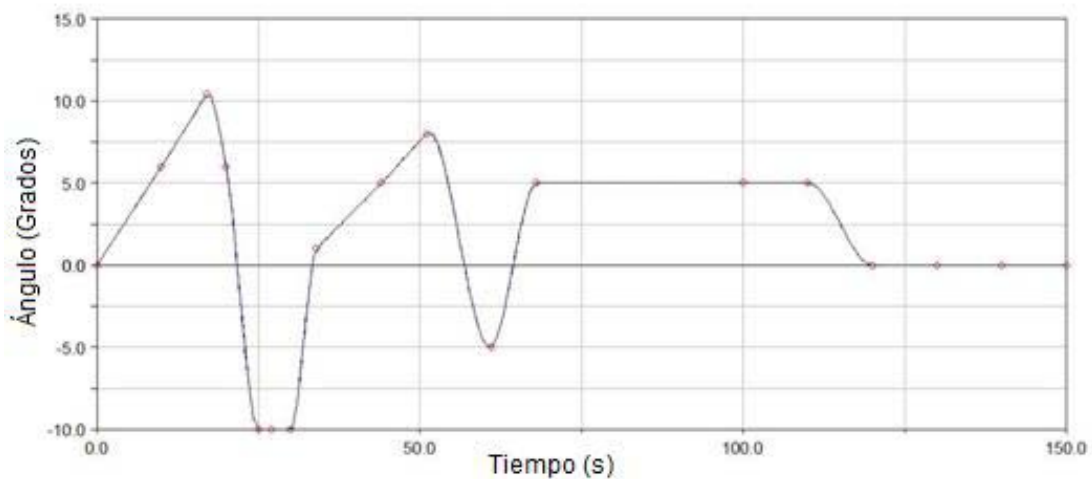


Figura 26. Ejemplo del movimiento de un cuadrúpedo corriendo



(a)



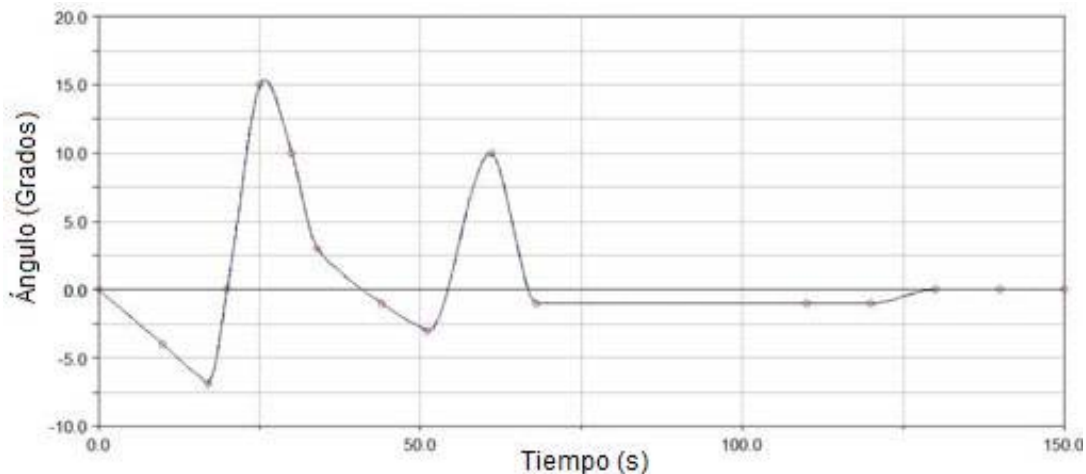
(b)

Figura 27. Entradas de las patas 3 y 4: (a) posición del motor 3, (b) posición del motor 7

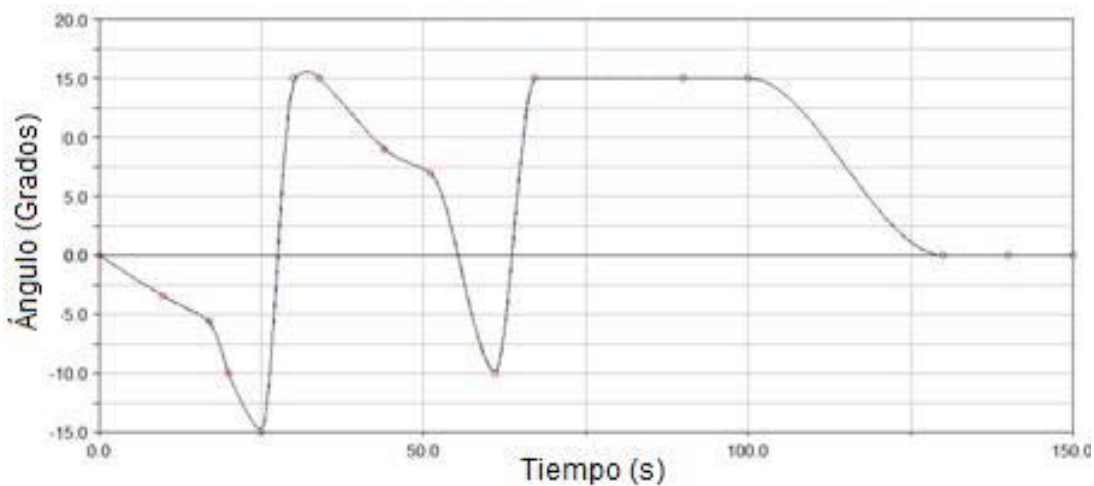
Los movimientos de las 4 patas quedan perfectamente definidos con los gráficos 27 y 28. Al igual que en el caso de la simulación caminando, es posible establecer una periodicidad en los movimientos de las patas del cuadrúpedo en esta simulación. Este aspecto es muy útil para la prolongación de los movimientos de la simulación a partir de este patrón, si fuera necesario. El movimiento que debería llevar el cuadrúpedo cuando se incluya motor encendido y aislante debe originar resultados parecidos a los que se obtengan en la simulación ideal. En definitiva un punto importante de estudio será establecer analogías y diferencias entre las simulaciones del cuadrúpedo corriendo en los casos ideal y con fuerzas.

4.3 – Simulación del cuadrúpedo en el salto:

El salto es la última simulación que se desarrolla en este proyecto. Se define el salto como un movimiento en el que el cuadrúpedo no mantiene contacto con el suelo durante un determinado tiempo, alcanzando una altura h .



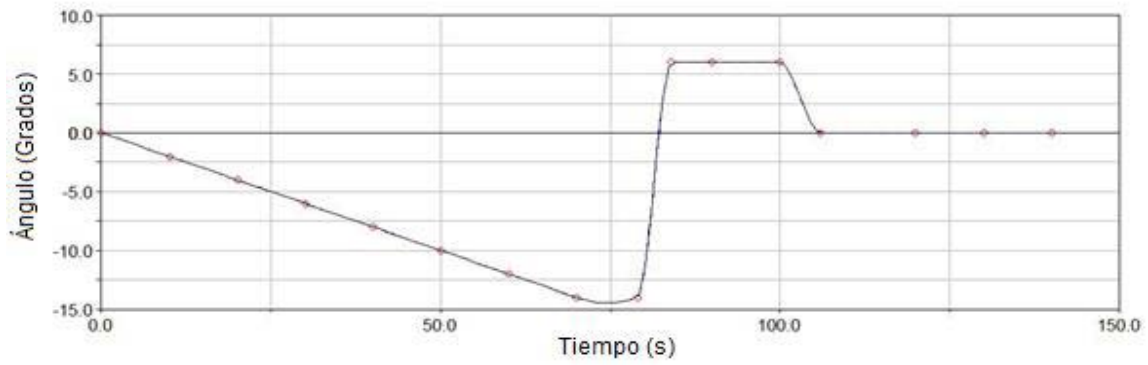
(a)



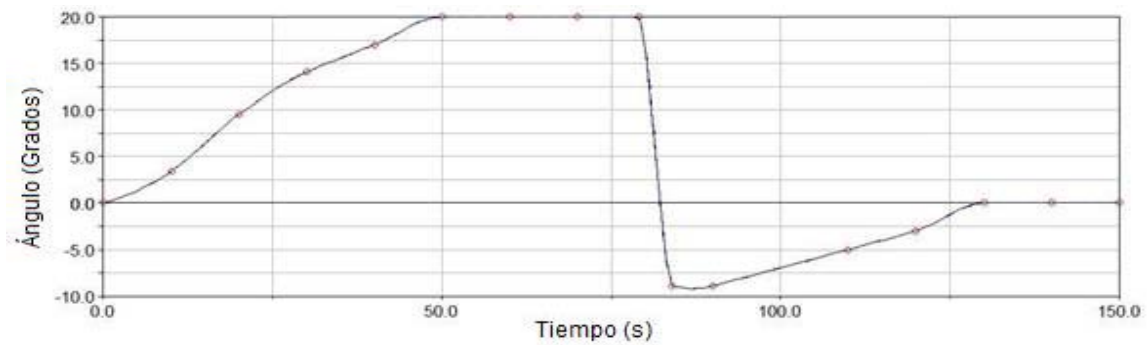
(b)

Figura 28. Entradas de las patas 1 y 2: (a) posición del motor 1, (b) posición del motor 5

La colocación de los motores es igual que en el caso de la simulación anterior. El tiempo de simulación en este caso es de 4 segundos y se considera suficiente para mostrar resultados relevantes en los movimientos del robot. En esta simulación, las dos patas delanteras realizan el mismo movimiento en el tiempo, ya no hay desfase. Por tanto los motores de las rodillas delanteras comparten la misma curva de movimiento. Lo mismo ocurre con las rodillas traseras y las caderas delanteras y traseras. La secuencia del movimiento es la siguiente: el cuadrúpedo comienza encogiéndose sus rodillas y caderas para tomar impulso. Cuando ha transcurrido aproximadamente un segundo, los motores actúan sobre las patas rápidamente estirándolas, lo que provoca que el robot se eleve y pierda el contacto con el suelo. Cuando el motor desciende, las patas se orientan para intentar mejorar el aterrizaje y evitar el vuelco. Cuando el robot contacta con el suelo de manera estable se acaba la simulación. En las gráficas de la figura 29 se muestran los valores de los movimientos para las patas delanteras (1 y 2). Realizan exactamente el mismo movimiento. En ambos gráficos se muestra en el primer segundo un descenso de los valores de giro, porque las patas se recogen. Después los valores aumentan rápidamente, para lograr realizar el salto. En la figura 30 se muestran las curvas de entrada de las patas traseras (3 y 4).

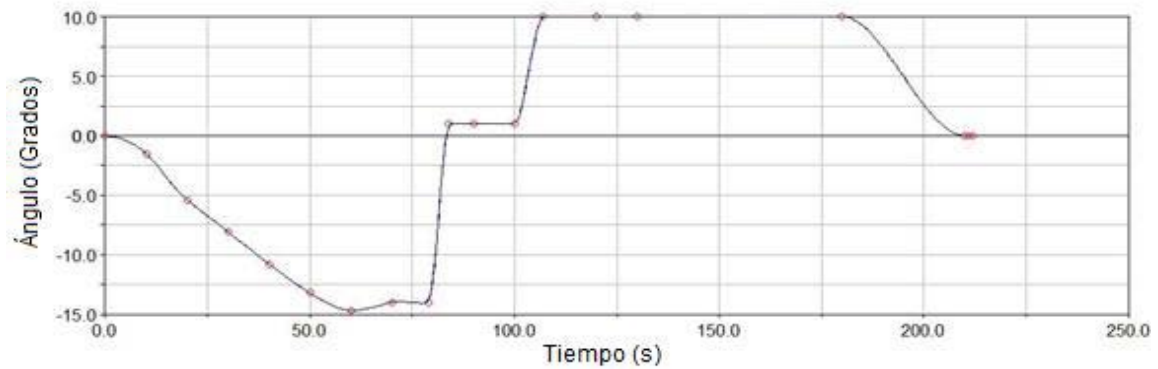


(a)

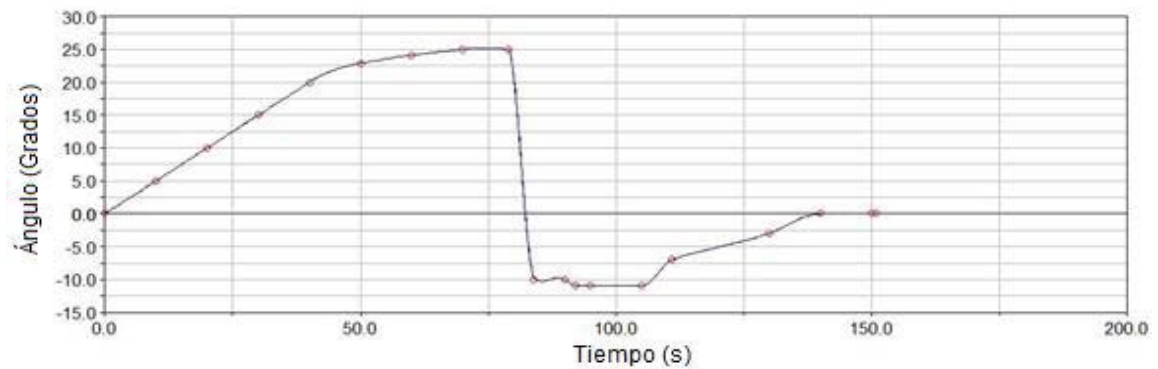


(b)

Figura 29. Entradas de las patas 1 y 2: (a) posición del motor 5, (b) posición del motor 2



(a)



(b)

Figura 30. Entradas de las patas 3 y 4: (a) posición del motor 7, (b) posición del motor 4

Al igual que en las patas delanteras, las caderas y las rodillas de las patas traseras realizan los mismos movimientos por lo que los motores comparten las curvas de movimiento. Los valores de estas gráficas dan una idea de cómo se recogen las patas del robot al empezar la simulación y cómo se estiran. Posteriormente las patas tratan de orientarse para amortiguar el aterrizaje. Con estas gráficas queda completamente definido el movimiento del robot en esta simulación. Este caso en el que el sistema no posee aislante y no hay fuerzas excitadoras supone el caso ideal de salto, al igual que ocurre en la carrera y caminata.

4.4 – Modelo de vibraciones:

Una vez simulados estos casos ideales, es momento de aplicar al sistema fuerzas externas, como si el motor estuviera encendido, para tratar de que las condiciones de trabajo del cuadrúpedo sean lo más realistas posible. El modelo de vibraciones consiste en realizar simulaciones en las que existen fuerzas externas aplicadas sobre el motor, para que simulen una vibración real del motor, como si éste estuviera encendido. Se toma como referencia las simulaciones ideales realizadas en el apartado anterior. En ellas serán aplicadas las fuerzas externas y posteriormente se analizará su efecto. Para aproximar las vibraciones que genera el motor, hay que consultar las especificaciones en el catálogo del motor de la figura 13. Se sabe que la fuerza que genera el eje al girar es:

$$- \quad \text{—————} \quad (1)$$

Donde,

Como el motor es de 50 Hz, eso significa que esta fuerza no es constante, sino que es cíclica y se repite en el tiempo con esa frecuencia. Para introducir esta fuerza en Adams de manera que se repita hay que buscar una ecuación matemática. Por tanto la expresión matemática con la que podemos expresar esta fuerza es:

$$(2)$$

Donde A es la fuerza en Newton (N) que se aplica en el eje del motor y el término cosenoidal expresa la frecuencia con la que se repite. Esta fuerza tiene una amplitud máxima de 1000 N y que es aplicada con una frecuencia de 50 Hz, sólo hay que indicar dónde aplicarla. Para una mejor aproximación a la vibración real del motor, se colocan dos fuerzas iguales y perpendiculares en el eje del motor en el contacto con la junta que une el motor al depósito. La figura 31 muestra 3 vistas de la colocación de las fuerzas excitadoras en el motor y de las direcciones y sentidos que poseen en el modelo de Adams. Al aplicar a estas fuerzas la frecuencia y la amplitud calculadas, el resultado es una vibración muy parecida a la que tendría el motor si estuviera arrancado. En Adams sólo hay que especificar un punto de aplicación, una dirección y el sentido. El módulo es el mismo para las dos fuerzas cuyo valor se obtuvo en la página anterior. En el gráfico 32 puede apreciarse la evolución temporal de la fuerza. El tiempo que tarda en ir de 1000 N a 1000 N es de 0,2 segundos. De esta manera la composición de estas dos fuerzas aplicadas en el motor va a generar unas vibraciones con las que se realizarán simulaciones partiendo de las anteriores que serán objeto de estudio en próximos apartados.

En resumen, después de hacer tres simulaciones: caminar, correr, saltar, ahora hay otras tres iguales pero con las fuerzas excitadoras aplicadas. El estudio de los resultados de las simulaciones con fuerzas externas y sin fuerzas externas nos permitirá diseñar un sistema de aislamiento efectivo.

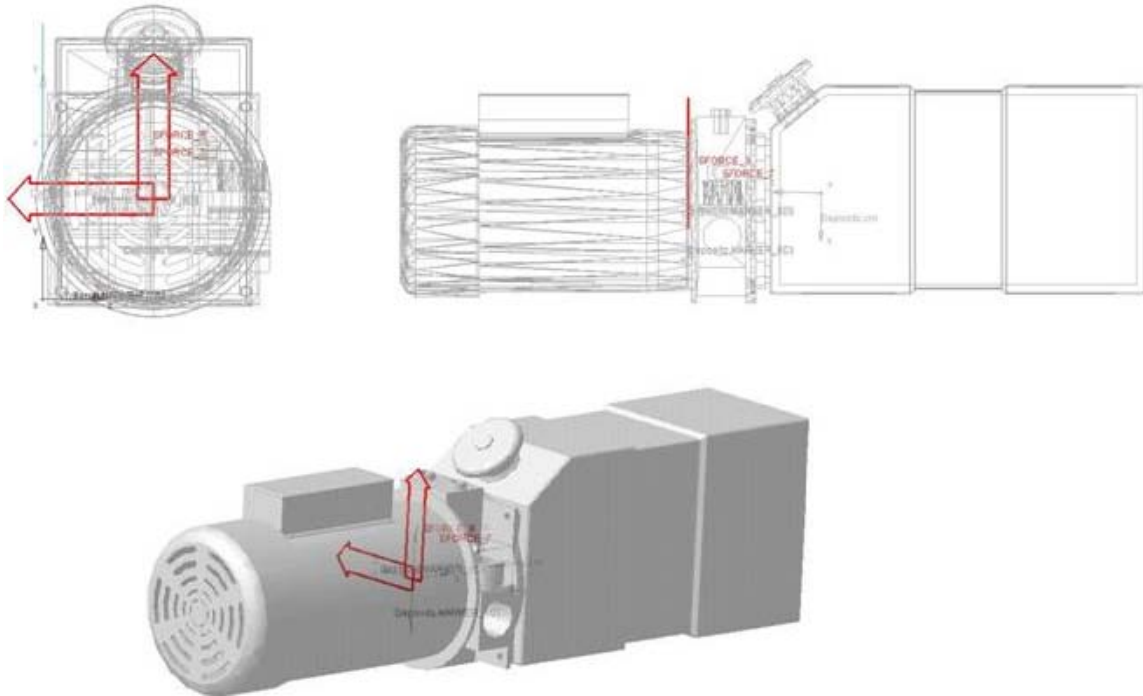


Figura 31. Gráficos de la situación de las fuerzas en el motor

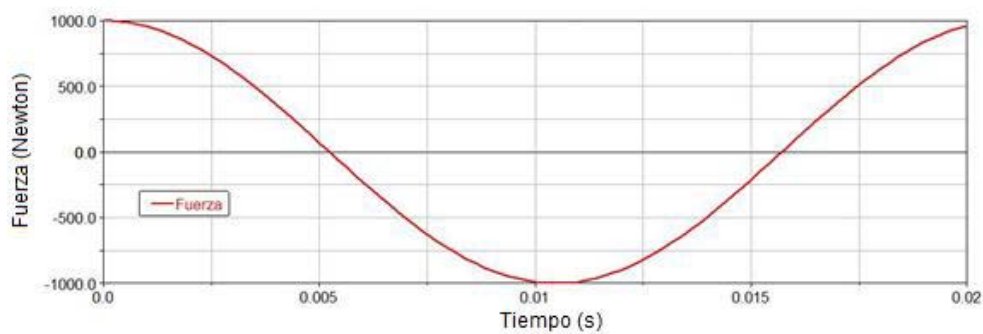


Figura 32. Gráfica de la evolución temporal de la fuerza en el motor

Capítulo 5

Resultados de la simulación dinámica

En este capítulo se analizan las simulaciones y se estudian diversos componentes, comparando resultados, para la obtención de un sistema de aislamiento de vibraciones efectivo. Los análisis de los resultados y los cálculos posteriores se han llevado a cabo mediante comparaciones entre las distintas simulaciones que se describieron en el capítulo 4. Para el salto se han comparado los resultados de la simulación del caso ideal sin fuerzas externas con los resultados de la simulación con fuerzas externas. Las diferencias entre uno y otro caso dan una idea de cómo afectan las fuerzas externas y las vibraciones que originan al funcionamiento normal del robot. Lo mismo ocurre con las simulaciones del cuadrúpedo corriendo y caminando.

5.1 - Resultados en el salto:

En la figura 33 se muestran los instantes más importantes del desarrollo del salto. La figura 33 a) muestra el inicio de la simulación en donde el robot empieza a encogerse para coger impulso. En la figura 33 b) el cuadrúpedo está flexionado completamente. En la figura 33 c) las patas se estiran rápidamente lo cual provoca que el robot se eleve alcance una cierta altura. La figura 33 d) muestra la caída y contacto con el suelo, adaptando las patas para una mejor amortiguación. La simulación del salto con fuerzas externas aplicadas describe una trayectoria irregular. Además, cuando el robot se encoge sin mover las patas, está continuamente vibrando y girando levemente. Incluso puede apreciarse mayor dificultad al caer en el suelo y rebotar, pues las patas no contactan a la vez. Todos estos efectos no ocurren en la simulación sin fuerzas externas aplicadas. Las alteraciones en la trayectoria son grandes y notorias y las causantes son las fuerzas externas aplicadas. Hay que tener en cuenta que el motor impone una limitación en la fuerza que generan los actuadores que mueven las patas. Cada actuador puede ejercer un total de 3200 Newton de fuerza. Es necesario comprobar en Adams la fuerza que se ejerce en las juntas y las aceleraciones de los cilindros donde van alojados los actuadores. La figura 34 muestra las trayectorias descritas por el centro de masas (CM) del torso en la simulación sin fuerzas externas aplicadas (caso ideal) y en la simulación con fuerzas externas aplicadas. Puede apreciarse la diferencia de alturas descrita por el centro de masas del torso en la simulación del salto. En color rojo y línea discontinua está descrita la trayectoria del CM del torso en la simulación con fuerzas externas y en azul con línea continua aparece la curva que describe ese punto en el caso ideal. Se estudia el centro de masas del torso porque es la pieza sobre la que descansa el motor y es precisamente donde se pretende aislar las vibraciones para que no se transmitan al resto de la estructura. En el gráfico no se muestra ni el comienzo ni el final de la simulación por no haber desplazamientos. Pueden observarse tres puntos importantes en la figura 34 que son las dos crestas y la parte final antes del segundo 3. La primera cresta se debe a la altura que alcanza el CM del torso en las simulaciones. La altura alcanzada en ambos casos es parecida pero se ve la curva de la simulación con fuerzas por encima de la curva del caso ideal. La segunda cresta es debida al rebote del robot con el suelo. Aunque hay una gran diferencia entre ambos casos, no se puede decir que se deba exclusivamente al efecto de las fuerzas externas. Lo más probable es que,

por efecto de las fuerzas, haya algún rebote que haga que varíe la altura considerablemente de un caso a otro. La parte final de la curva es el punto más importante, pues cuando el robot se empieza a detener cerca del segundo 3, probablemente las vibraciones originen esas diferencias pues no se aprecian rebotes considerables con el suelo.

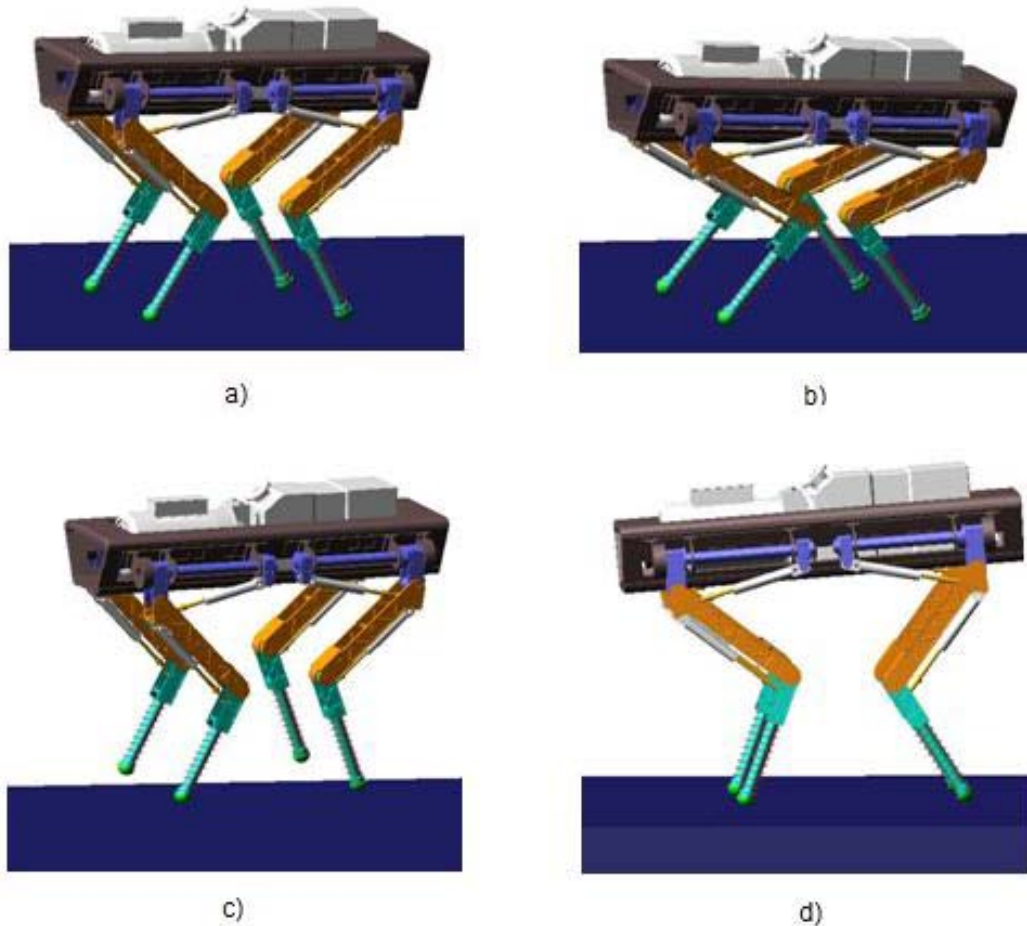


Figura 33. Secuencia de imágenes del salto: a) flexión de las patas, b) comienzo del salto, c) altura máxima alcanzada, d) contacto y amortiguación con el suelo

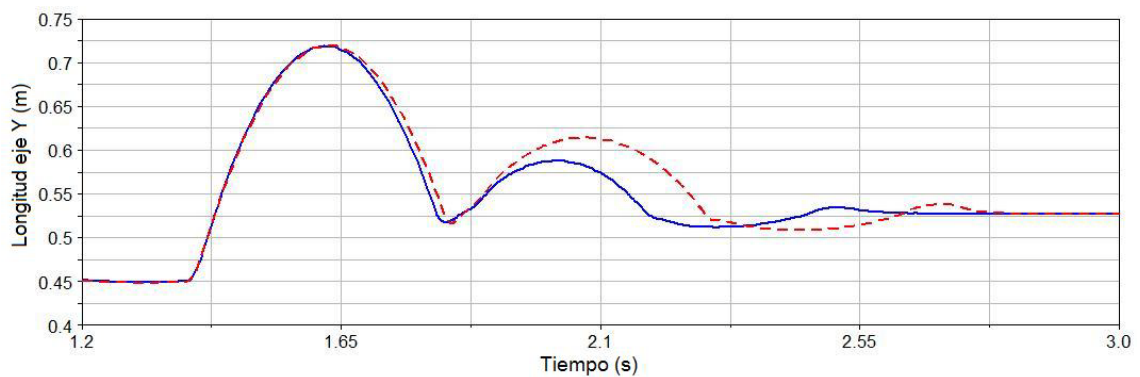


Figura 34. Gráfica con las trayectorias en el eje Y del CM del torso en la simulación del salto con fuerzas externas y sin fuerzas externas

La figura 35 es similar a la anterior pero en el eje Z, que es paralelo al plano del suelo. Muestra diferencias mucho más grandes que la diferencia de trayectorias en el eje Y. La curva sin fuerza en color azul y línea discontinua describe una recta, lo que significa que el cuadrúpedo va en línea recta en esta simulación. En la curva de la simulación con fuerza, de color rojo con línea continua, se aprecia una variación de la dirección debida al efecto de las fuerzas del motor. Esta variación de la dirección en la simulación va a ocasionar que el robot vaya girando constantemente a lo largo de la simulación, variando su trayectoria. Si el robot siguiera avanzando en el tiempo, la desviación sería cada vez mayor. La figura 36 representa las fuerzas que sufre la junta que une el conjunto motor con el torso. Este análisis es importante pues sin aplicar un aislante, las dos piezas se comportan como si estuvieran unidas por la junta. Es posible apreciar la evolución temporal de la fuerza que sufre la junta en esta simulación. La curva azul representa la transmisión de fuerzas que hay del motor al torso. La curva roja es el resultado de aplicar un filtro a la curva de la fuerza. El motivo de usar este filtro es para eliminar valores atípicos de la curva sin filtrar. Es posible apreciar en la curva sin filtrar que se alcanzan valores muy altos y aislados. La realidad es que Adams no tiene en cuenta esos valores atípicos y los pasa por alto en sus cálculos, por lo que es más correcto usar un filtro. Puede observarse que los valores máximos de fuerza que sufre esta unión son próximos a 1000 Newton. Es más correcto usar un filtro para representar este tipo de curvas, pues los cálculos que tiende a hacer Adams están más próximos a la curva filtrada que a la original, pues si Adams encuentra cambios bruscos y repentinos a lo largo de la curva, los pasará por alto.

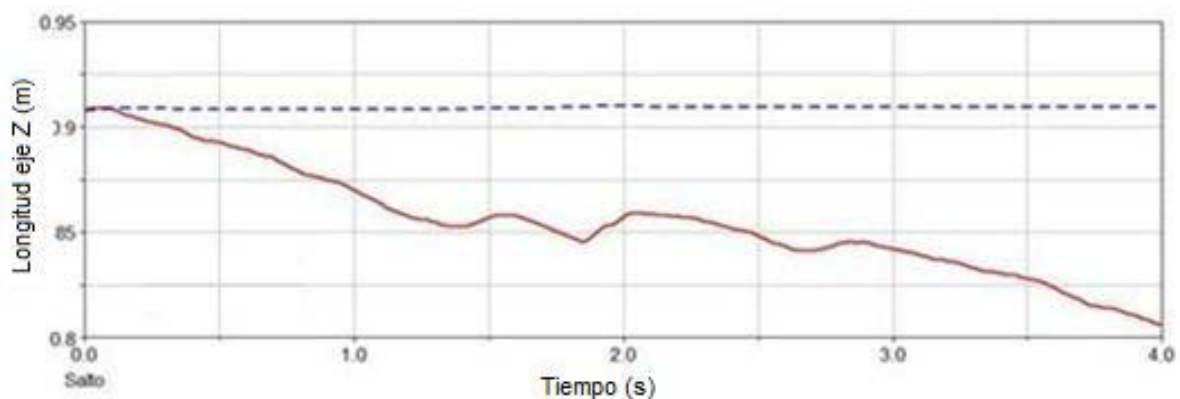


Figura 35. Gráfica con las trayectorias en el eje Z del CM del torso en la simulación del salto con fuerzas externas y sin fuerzas externas

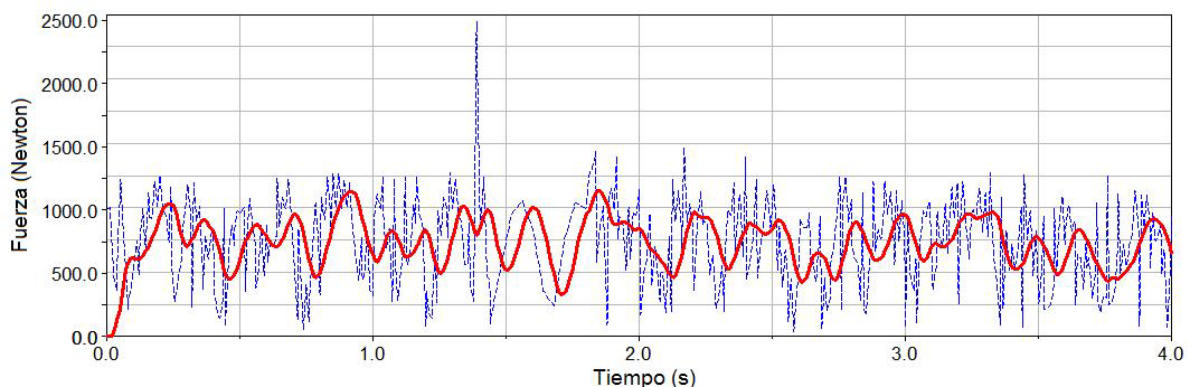


Figura 36. Gráfica de la fuerza que soporta la unión entre el conjunto motor y el torso en la simulación del salto con fuerzas externas aplicadas

La figura 37 muestra el cuadro de diálogo en el que Adams permite configurar un filtro para aplicarlo a las curvas de las gráficas. Se usa el filtro que aparece por defecto en el programa al usar esta herramienta. Es un filtro definido como butterworth y de tipo paso bajo, por lo que permite el paso de frecuencias bajas y atenúa el paso de frecuencias altas. El uso del filtro se aplica a varias gráficas en este proyecto con el fin de ilustrar mejor las curvas y realizar un mejor análisis. La curva de la figura 36 en color rojo, es un ejemplo de la aplicación de este filtro y de los efectos mencionados. En la figura 38 aparece una gráfica con la evolución del par en la unión del conjunto motor con el torso. En color azul y línea discontinua está representada la curva del par que se transmite en esa unión. En color rojo y línea continua está representada la curva del par con el filtro recientemente descrito aplicado. La curva filtrada muestra una transmisión del par que se puede considerar constante a lo largo de toda la simulación, salvo durante el salto en donde se puede observar una menor intensidad del par. Por tanto, cuando el robot está en el aire y sus patas no contactan con el suelo, la transmisión del par es menos intensa y frecuente. La utilización del filtro es importante para la eliminación de datos atípicos en la curva del par. La curva filtrada indica que el valor máximo alcanzado no supera los 600 N.m y el valor medio son aproximadamente 400 N.m.

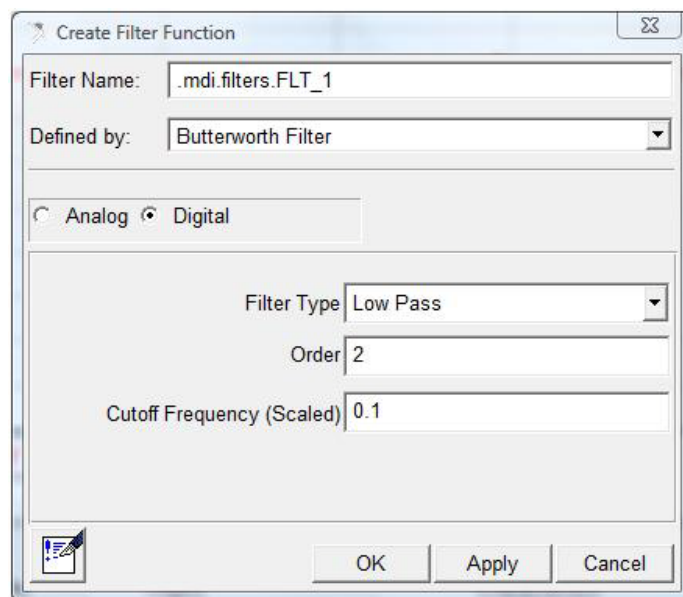


Figura 37. Aplicación de un filtro en Adams

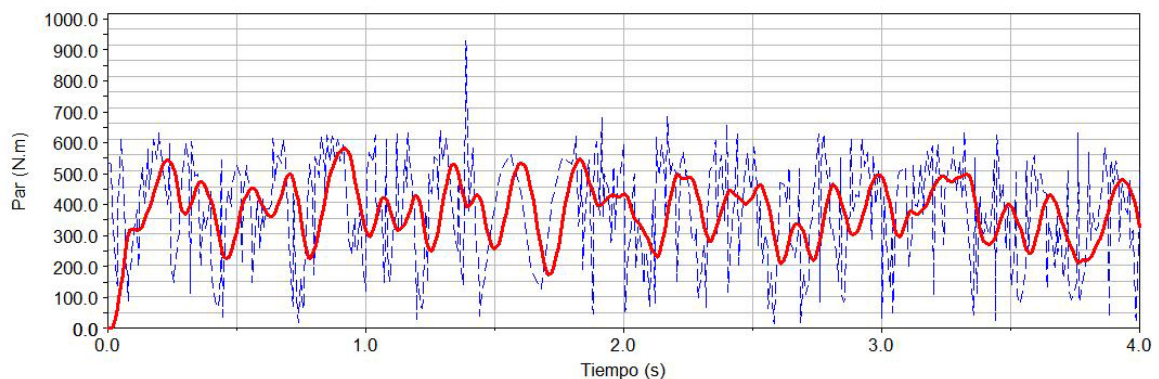


Figura 38. Gráfica del Par que se transmite en la unión entre el conjunto motor y el torso en la simulación del robot en el salto con fuerzas externas aplicadas

5.2 - Resultados caminando:

En la secuencia de imágenes de la figura 39 se muestran los momentos más importantes del desarrollo de la simulación del robot caminando: la figura 39 a) muestra el inicio de la simulación en donde el robot empieza sus primeros movimientos. El cuadrúpedo levanta la pata número 1 y la avanza mientras las demás desplazan. En la figura 39 b) el robot levanta la pata número 2 cuando la pata 4 ha contactado con el suelo y se desplaza. En figura 39 c) el robot levanta la pata número 4 cuando la pata 1 ha contactado con el suelo y se desplaza. En la figura 39 d) El robot levanta la pata número 3 cuando la pata 2 ha contactado con el suelo y se desplaza. Esta es la forma de generar movimiento en esta simulación. Es difícil mantener la estabilidad cuando levantas una pata y no balanceas el cuerpo hacia los lados. Es importante el concepto del triángulo de apoyo. Este triángulo es imaginario y consiste en que cuando una pata se levanta, las otras tres describen en el suelo un triángulo. Mientras la proyección horizontal del CM del conjunto quede dentro de ese triángulo, el cuadrúpedo permanecerá estable. Si esto ocurre el cuadrúpedo pierde el equilibrio y cae por el lado de la pata levantada.

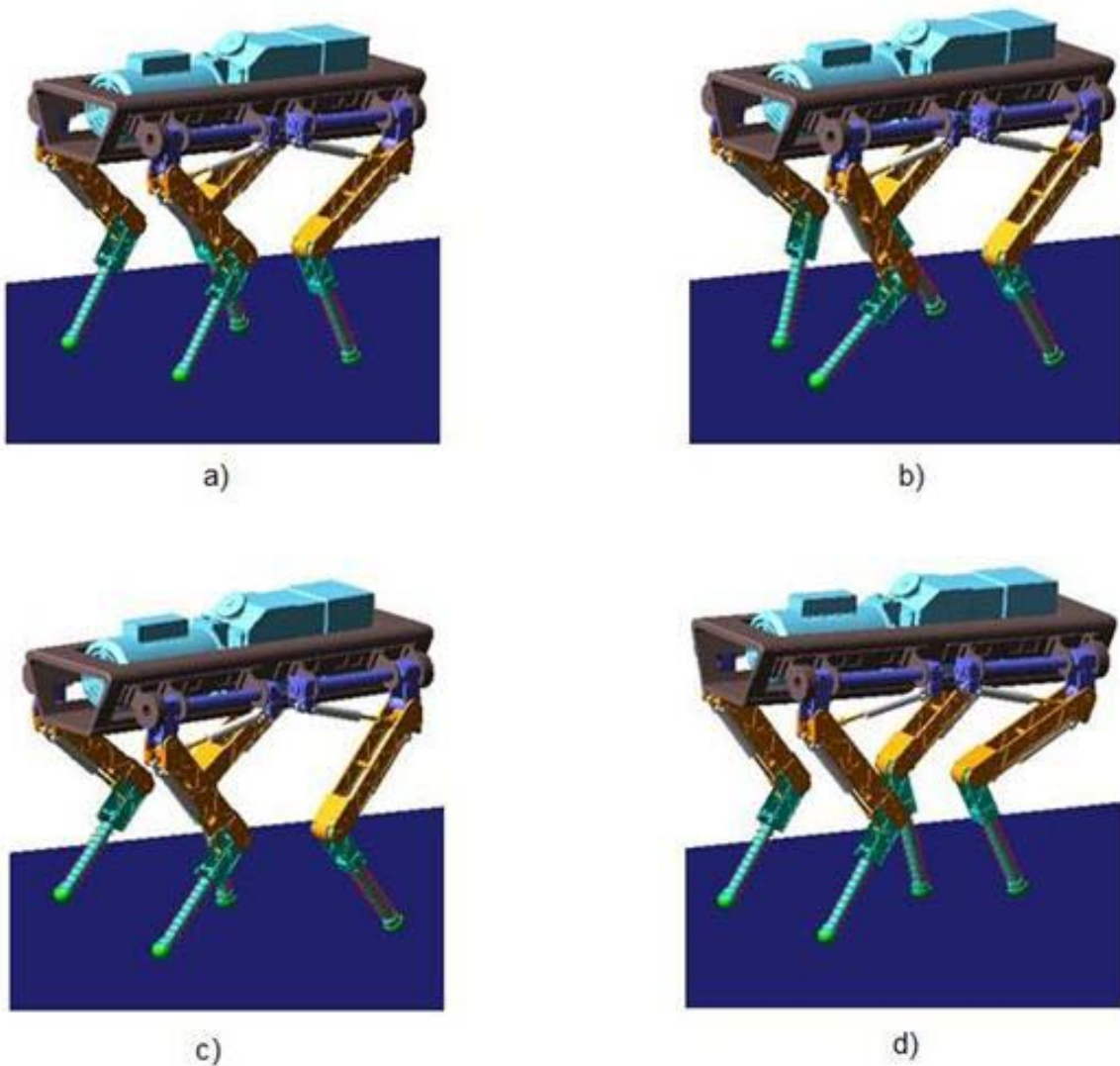


Figura 39. Secuencia de imágenes caminando: a) movimiento de la pata 1, b) movimiento de la pata 4, c) movimiento de la pata 2, d) movimiento de la pata 3

La simulación del robot caminando con fuerzas externas aplicadas describe una trayectoria irregular, más o menos parecida a la simulación del robot caminando sin fuerzas, pero se observan alteraciones por el efecto que crean las fuerzas externas. A diferencia de la simulación del salto en la que había una pérdida de contacto total de las patas con el suelo, en esta simulación caminando los movimientos son parecidos y el robot se desplaza cíclicamente. Las fuerzas provocan que el robot se desvíe de la trayectoria inicial y además se aprecian rebotes y golpes de alguna pata con el suelo, lo cual es un efecto no deseado. Estos problemas confirman que las vibraciones causadas deben ser atenuadas. La figura 40 contiene las trayectorias que describe el centro de masas del torso en la simulación del robot caminando en el caso sin fuerzas externas y con fuerzas externas aplicadas. La curva de color negro formada por rayas y puntos corresponde a la trayectoria de la simulación sin fuerzas, y la curva morada formada por puntos corresponde a la trayectoria con fuerzas externas. Pueden observarse dos zonas principales afectadas por el efecto de las fuerzas en el segundo 2 y en el segundo 4. El pico en el segundo puede ser debido a un rebote de una pata al contactar con el suelo. En esta simulación se ha aplicado el filtro de la figura 37 a las curvas de las trayectorias para realizar un análisis más eficaz. Por el efecto del filtro, las curvas empiezan con una altura 0 y va aumentando hasta llegar a 0,55 m en medio segundo aproximadamente. Esto no significa que el robot se levante desde el suelo hasta esa altura y empiece a caminar, sino que son cálculos que realiza el programa y el resultado son curvas con ese aspecto. Por eso las diferencias entre las curvas en el inicio no son objeto de estudio y no se tienen en cuenta. La figura 41 muestra una gráfica con las trayectorias que describe el centro de masas del torso. La curva de color negro formada por rayas y puntos es el caso de la simulación sin fuerzas externas, y la curva de color morado formada por puntos corresponde al caso de la simulación con fuerzas externas. En el eje Z el centro de masas describe trayectorias parecidas, pero con una evidente desviación en su recorrido. Esta desviación es debida al efecto de las fuerzas, pues las vibraciones hacen que la trayectoria varíe respecto del caso ideal. Para las curvas de esta gráfica también ha sido usado el filtro de la figura 37. Por tanto la parte inicial de las curvas que empieza en cero, corresponde a cálculos y no se tiene en cuenta para los resultados del proyecto. La diferencia en la trayectoria de la curva de la simulación con fuerzas se debe a una desviación del robot al caminar provocada por el efecto de las fuerzas vibratorias. Es decir, el robot está girando.

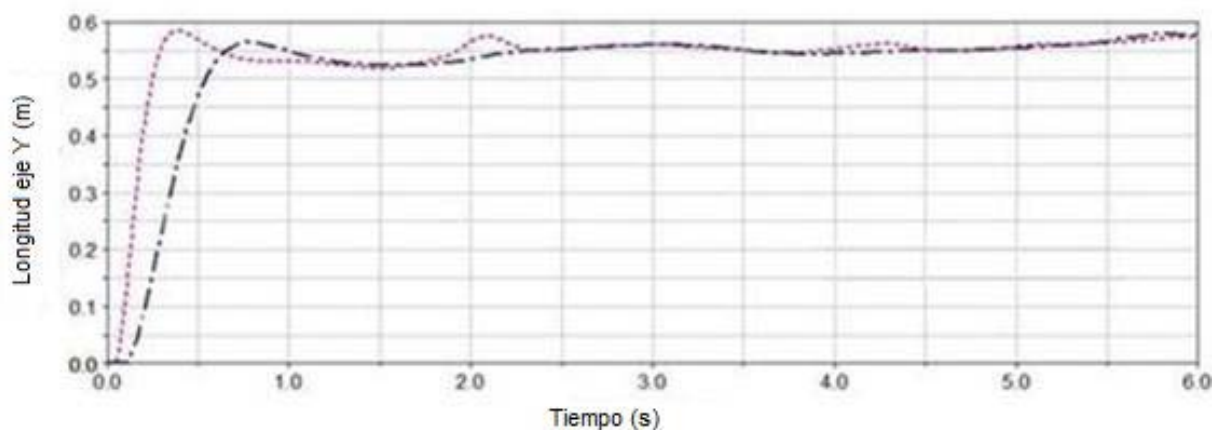


Figura 40. Gráfica con las trayectorias en el eje Y del CM del torso en la simulación del robot caminando con fuerzas externas y sin fuerzas externas

La figura 42 muestra una gráfica con la evolución de la fuerza que soporta la unión del torso y el conjunto motor durante la simulación. En color azul y trazo discontinuo se representa la fuerza de la unión, y en color rojo y línea continua se filtra la curva normal para eliminar datos atípicos y suavizar la curva. Se ha usado el filtro la figura 37. El rango de valores de la curva de la simulación sin fuerzas es de entre 300 y 1300 Newton aproximadamente. El valor medio de la curva de la fuerza con el filtro aplicado es 700 Newton. Las curvas del gráfico no muestran valores excesivamente altos, o variaciones muy grandes ni cambios bruscos en ningún punto. La figura 43 muestra una gráfica con la evolución del par en la unión del conjunto motor con el torso. En color azul y línea discontinua está representada la curva del par que se transmite en esa unión. En color rojo y línea continua está representada la curva del par con el filtro (descrito en la figura 37) aplicado. La curva filtrada muestra una transmisión del par que se puede considerar constante a lo largo de toda la simulación, pues no presenta cambios bruscos ni picos aislados. La curva filtrada indica que el valor máximo alcanzado no supera los 110 N.m y el valor medio son aproximadamente 85 N.m. Estos valores son mucho más pequeños que los indicados en los resultados de la gráfica del par en el salto. Es posible que con el sistema en movimiento la transmisión del par sea menor, aunque esto no ocurre con la transmisión de fuerzas.

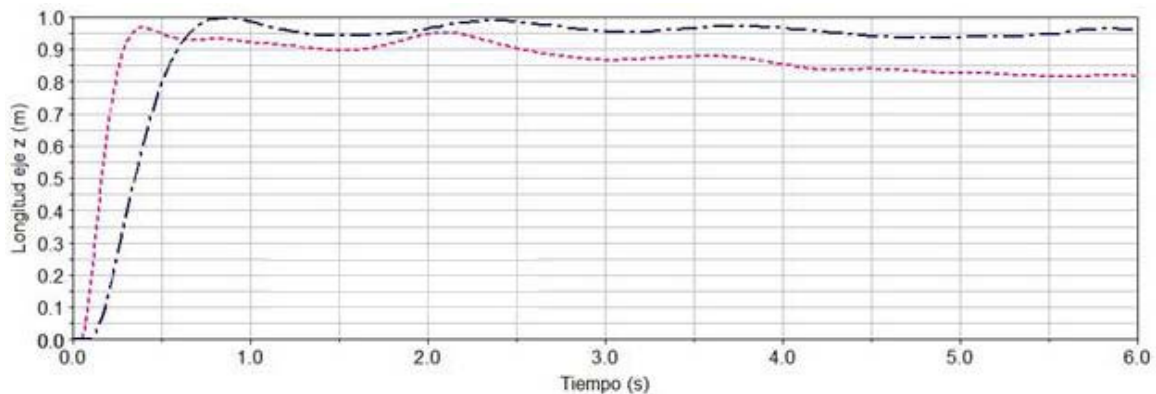


Figura 41. Gráfica con las trayectorias en el eje Z del CM del torso en la simulación del robot caminando con fuerzas externas y sin fuerzas externas

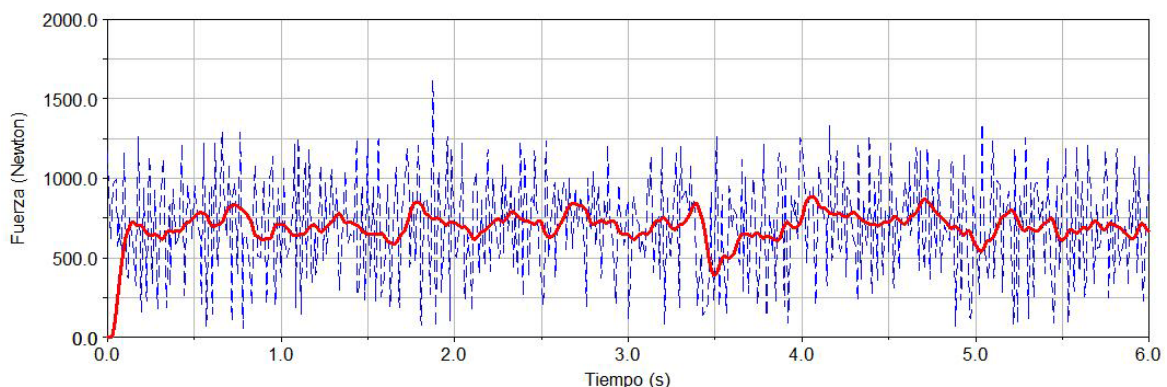


Figura 42. Gráfica de la fuerza que soporta la unión entre el conjunto motor y el torso en la simulación del robot caminando, con fuerzas externas aplicadas

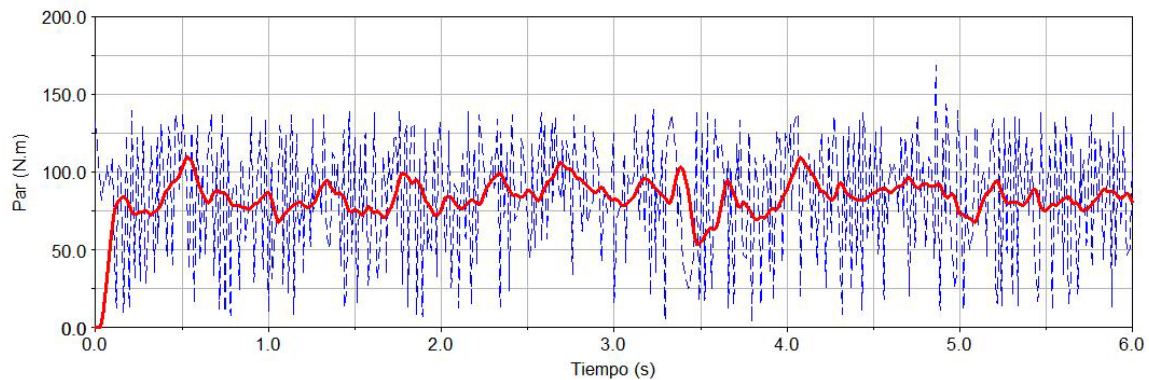


Figura 43. Gráfica del Par que se transmite la unión entre el conjunto motor y el torso en la simulación del robot caminando con fuerzas externas aplicadas

5.3 - Resultados corriendo:

La última simulación realizada es la carrera, cuyos resultados se analizarán en este capítulo. El movimiento en carrera es aquel en el que el cuadrúpedo levanta dos patas en diagonal y las avanza mientras que las otras dos desplazan. Cuando las primeras contactan con el suelo, empiezan a desplazarse y se levantan las patas de la otra diagonal. Este movimiento repetido en el tiempo genera un movimiento más rápido aunque menos estable. En la secuencia de imágenes de la figura 39 se muestran los momentos más importantes del desarrollo de la simulación del robot corriendo: el gráfico a) muestra el inicio de la simulación en donde el robot empieza sus primeros movimientos. El cuadrúpedo levanta las patas 2 y 3 y las avanza mientras las demás desplazan. En el gráfico b) el robot levanta las patas 1 y 4 cuando las otras han contactado con el suelo y desplazan. En el gráfico c) el robot recoge las patas 2 y 3 para contactar con el suelo. En el gráfico d) el robot recoge las patas 1 y 4 para contactar con el suelo. Esta es la forma de generar movimiento en esta simulación. En esta simulación conseguir que el cuadrúpedo sea estable es muy complicado. Ahora no hay un triángulo de apoyo para buscar el equilibrio. Las patas deben subir, avanzar y bajar más deprisa para aportar cierta estabilidad en el movimiento general, lo que provoca que la velocidad de esta simulación sea algo mayor. Imaginemos una línea que une las patas en apoyo cuando las otras dos se levantan. Mientras el centro de masas se mantenga en esa línea, habrá equilibrio. A medida que se aleja la proyección del CM de esa línea de apoyo, la estabilidad será menor y el cuadrúpedo tenderá a volcar más o menos deprisa cuanto mayor sea la distancia a la línea.

La simulación del robot corriendo con fuerzas externas aplicadas describe una trayectoria irregular, más o menos parecida a la simulación del robot corriendo sin fuerzas, pero se observan alteraciones por el efecto que crean las fuerzas externas. A diferencia de la simulación del salto en la que había una pérdida de contacto total de las patas con el suelo, en esta simulación corriendo los movimientos son parecidos y el robot se desplaza cíclicamente. Las fuerzas provocan que el robot se desvíe de la trayectoria inicial y además se aprecian rebotes y golpes de alguna pata con el suelo, lo cual es un efecto no deseado. Estos problemas confirman que las vibraciones causadas deben ser atenuadas. La gráfica de la figura 45 contiene las curvas que describe la trayectoria del centro de masas del robot en el eje Y, en la simulación sin fuerzas externas y con fuerzas externas aplicadas. En color rojo y línea punteada está la curva correspondiente al caso con fuerzas aplicadas. En color azul y línea formada por puntos y rayas está la curva del caso sin fuerzas (ideal). En general las curvas describen trayectorias parecidas menos a partir del segundo uno, donde se ve una notoria diferencia entre las dos curvas. La diferencia es debida a que el cuadrúpedo en el caso con fuerzas realiza un salto que no realiza en el caso sin fuerzas, al chocar una pata con el suelo.

Esto ocurre porque las fuerzas modifican la trayectoria del cuadrúpedo y al no haber un sistema de control que mueva las patas en función de las necesidades de estabilidad, los movimientos usados de las patas para la carrera sin fuerzas, originan choques contra el suelo en el caso con fuerzas.

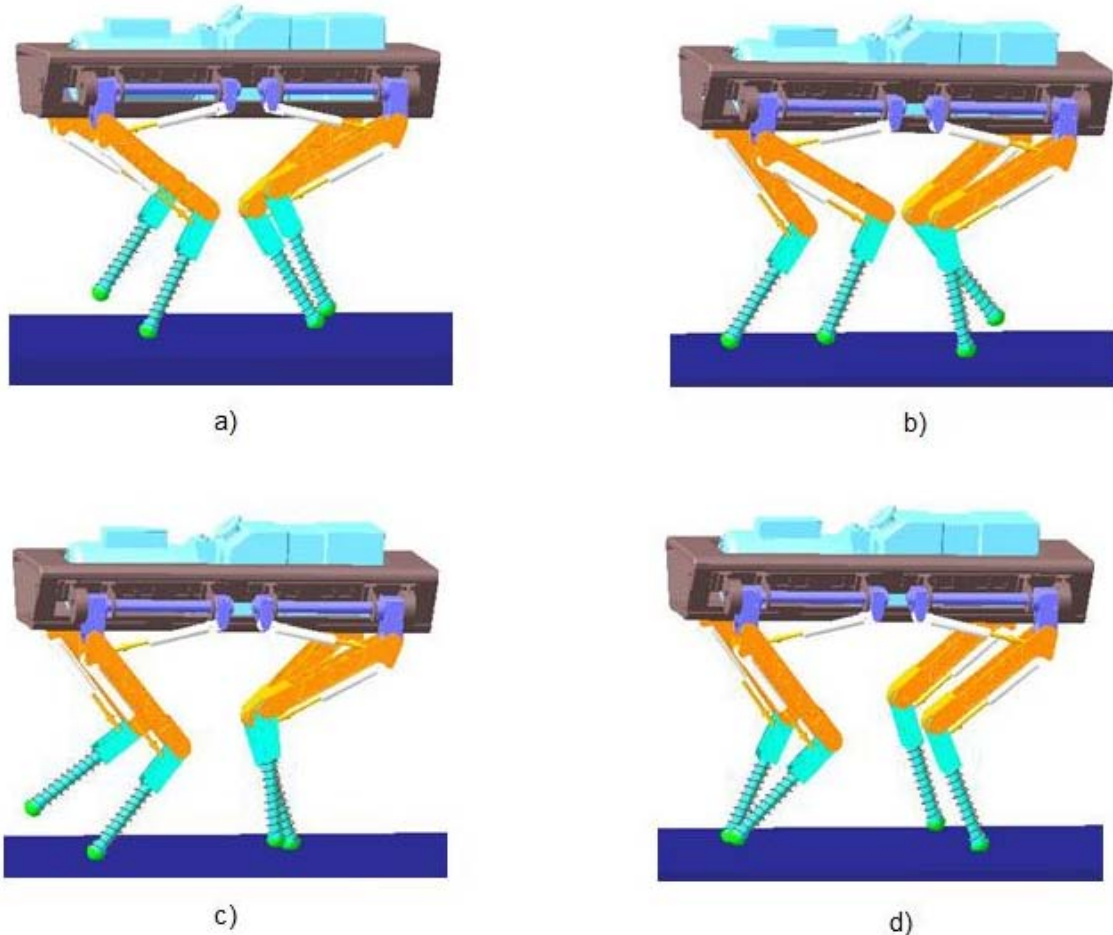


Figura 44. Secuencia de imágenes corriendo: a) movimiento de las patas 2 y 3 levantándose, b) movimiento de las patas 1 y 4 levantándose, c) movimiento de las patas 2 y 3 contactando con el suelo, d) movimiento de las patas 1 y 4 contactando con el suelo

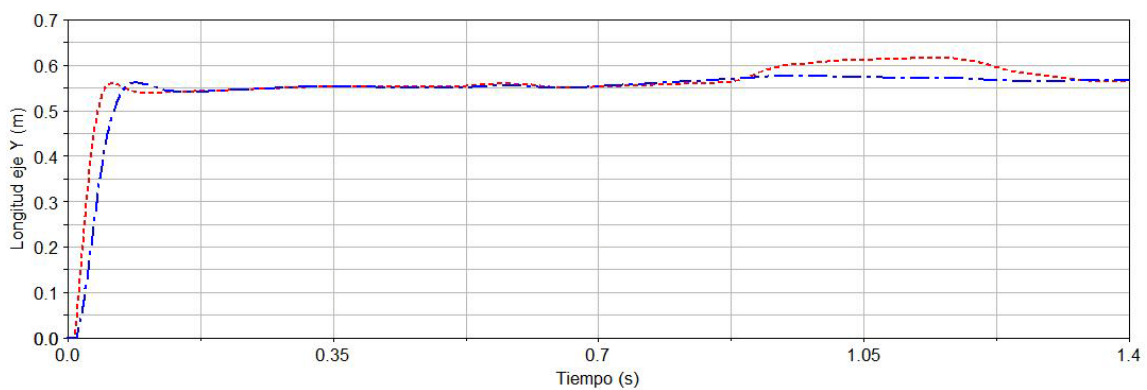


Figura 45. Gráfica con las trayectorias en el eje Y del CM del torso en la simulación del robot corriendo con fuerzas externas y sin fuerzas externas

La gráfica de la figura 46 contiene las curvas que describe la trayectoria del centro de masas del robot en el eje Z, en la simulación sin fuerzas externas y con fuerzas externas aplicadas. En color rojo y línea punteada está la curva correspondiente al caso con fuerzas aplicadas. En color azul y línea formada por puntos y rayas está la curva del caso sin fuerzas (ideal). En general las trayectorias son parecidas, pero a partir de 0,7 segundos en la simulación hay pequeñas diferencias, que se hacen mayores a medida que avanza la simulación. Estos cambios en la gráfica se traducen en pequeños cambios de dirección lateral por el efecto de las fuerzas. Evidentemente si se realiza una simulación de mayor duración las desviaciones longitudinales pueden agrandarse mucho, salvo que se corrijan. Tanto las curvas de la figura 45 como las de la figura 46, han sido representadas con la aplicación del filtro descrito en la figura 37. Por ello las partes iniciales de las dos gráficas tienen ese aspecto creciente desde el origen, pero como se ha explicado con anterioridad, no se van a tener en cuenta para las conclusiones y cálculos en este proyecto. Las diferencias más grandes en esta simulación se aprecian a partir de 0,7 segundos de simulación. La figura 47 muestra una gráfica con la evolución de la fuerza que soporta la unión del torso y el conjunto motor durante la simulación. En color azul y trazo discontinuo se representa la fuerza de la unión y en color rojo y línea continua se filtra la curva normal para eliminar datos atípicos y suavizar la curva. Se usa el filtro de la figura 37. El rango de valores de la curva de la simulación sin fuerzas es de entre 50 y 1000 Newton aproximadamente. El valor medio de la curva de la fuerza con el filtro aplicado es 715 Newton.

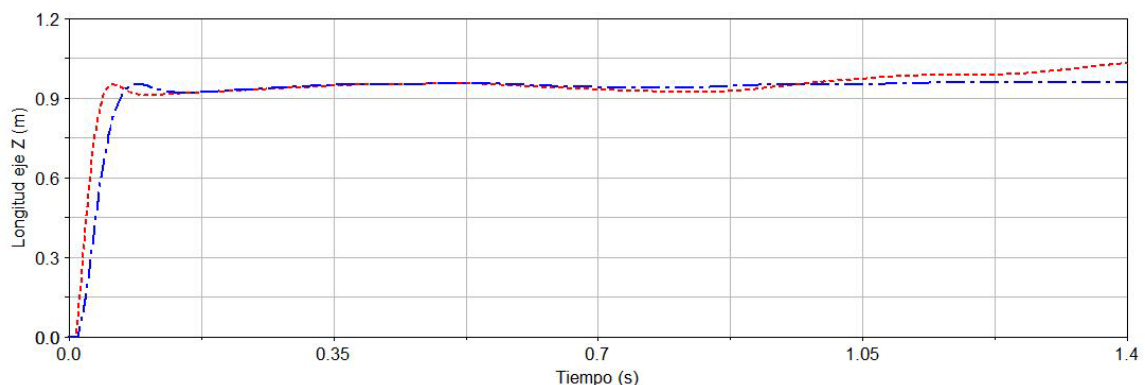


Figura 46. Gráfica con las trayectorias en el eje Z del CM del torso en la simulación del robot corriendo con fuerzas externas y sin fuerzas externas

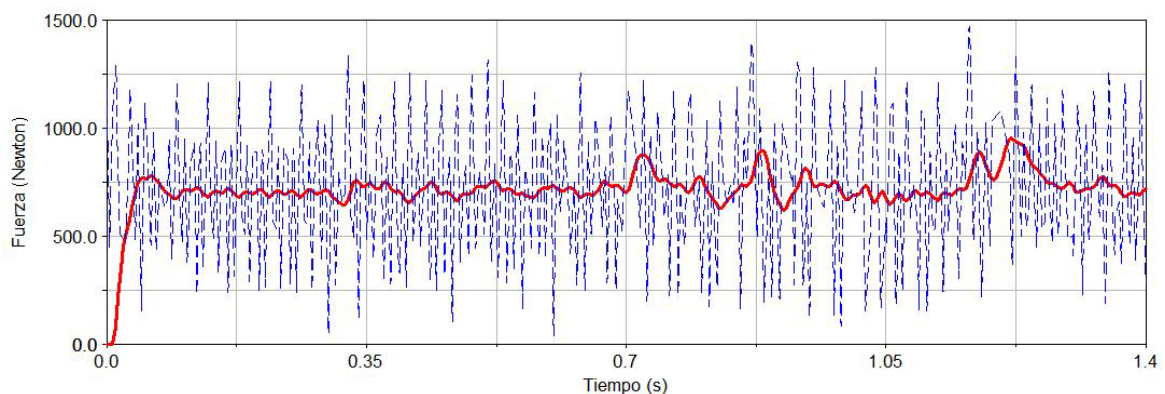


Figura 47. Gráfica de la fuerza que soporta la unión entre el conjunto motor y el torso en la simulación del robot corriendo con fuerzas externas aplicadas

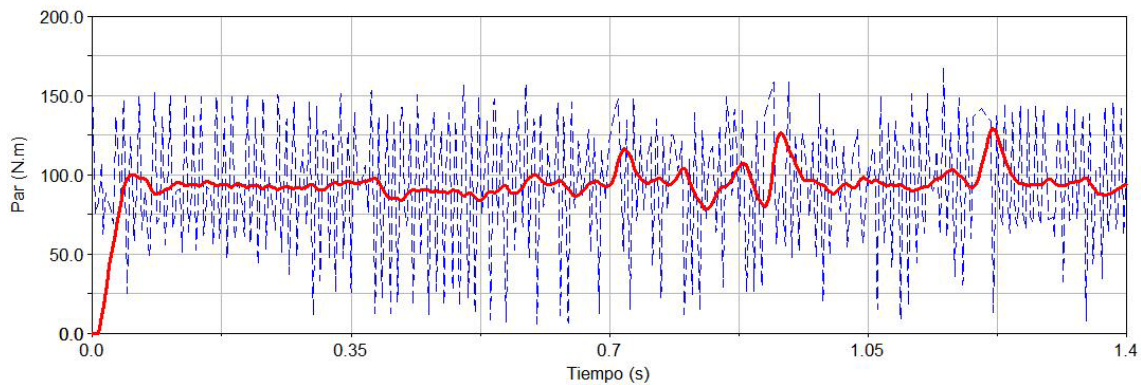


Figura 48. Gráfica del Par que se transmite la unión entre el conjunto motor y el torso en la simulación del robot corriendo con fuerzas externas aplicadas

La figura 48 muestra una gráfica con la evolución del par en la unión del conjunto motor con el torso. En color azul y línea discontinua está representada la curva del par que se transmite en esa unión. En color rojo y línea continua está representada la curva del par con el filtro aplicado (descrito en la figura 37). La curva filtrada muestra una transmisión del par que se puede considerar constante a lo largo de toda la simulación, pero presenta algunos picos que son debidos a los choques de las patas con el suelo. Cuando una pata choca o rebota con el suelo, se transmiten fuerzas por toda la estructura que llegan a afectar a la unión entre el motor y el torso. Por eso los valores del par que se observan en esta gráfica se ven alterados por este problema. La utilización del filtro es importante para la eliminación de datos atípicos en la curva del par. La curva filtrada indica que el valor máximo alcanzado no supera los 130 N.m y el valor medio son aproximadamente 95 N.m. Estos valores son mucho más pequeños que los indicados en los resultados de la gráfica del par en el salto, pero se aproximan mucho a los valores del par obtenidos en la simulación del robot caminando. Es posible que con el sistema en movimiento la transmisión del par sea menor, aunque esto no ocurre con la transmisión de fuerzas. Los valores del par más altos se registran en la simulación del salto, donde los valores son sensiblemente mayores y por ello, es posible la simulación de la que se obtienen resultados más interesantes para el análisis de las vibraciones sea la del salto.

Capítulo 6

Cálculo del sistema de aislamiento propuesto

En este capítulo se explican los cálculos, ecuaciones, teorías y aproximaciones utilizadas, para la obtención de los valores finales. El objetivo principal es el cálculo de la constante de elasticidad , y el coeficiente de amortiguación . De todos los resultados obtenidos en el capítulo 5, se toman los del caso más desfavorable que es el salto. La efectividad de los resultados obtenidos se discutirá en el capítulo 7.

6.1 – Identificación del sistema:

Las vibraciones libres las originan y mantienen fuerzas tales como las elásticas o gravitatorias, las cuales sólo dependen de la posición y movimiento del cuerpo. Las vibraciones forzadas las originan y mantienen fuerzas periódicas aplicadas exteriormente, y no dependen de la posición ni movimiento del cuerpo. Tanto las vibraciones libres como las forzadas se dividen en amortiguadas y no amortiguadas. Cuando las fuerzas de rozamiento, resistencia del aire, amortiguamiento viscoso, etc. sean despreciables, se dice que la vibración es no amortiguada. Cuando dichas fuerzas sean considerables, se trata de una vibración amortiguada. Una vibración libre amortiguada, llega a desaparecer en más o menos tiempo, [25]. En este caso el sistema ideal no presenta fuerzas excitadoras, por lo que se dice que el sistema es libre, y al no haber elementos amortiguadores consideramos el sistema libre no amortiguado. Está claro que todo sistema real contiene fuerzas de rozamiento que llegarían a detener las vibraciones libres. Sin embargo, en muchos sistemas la pérdida de energía debida a las resistencias, rozamientos, o resortes es tan pequeña que el análisis basado en despreciar el amortiguamiento, da resultados técnicamente satisfactorios. En particular, la frecuencia y período de oscilación que se obtiene para un sistema animado de vibraciones libres tienen un valor muy próximo al que se obtiene para un sistema vibrante con amortiguamiento pequeño, [25]. Esta “aproximación” tiene una importancia notable en el desarrollo de este proyecto, pues de esta manera es posible calcular la frecuencia natural del sistema en el caso ideal. Aunque el sistema está clasificado como vibración libre no amortiguada, sabemos que todo sistema real posee cierto amortiguamiento por pequeño que sea debido a la pequeña resistencia que existe entre los elementos de dicho sistema, y es precisamente en este supuesto donde podemos establecer relaciones con un sistema amortiguado.

El amortiguamiento viscoso tiene lugar de manera natural cuando sistemas mecánicos tales como el péndulo oscilan en el agua o aire. También presentan esta propiedad los amortiguadores que pueden ir montados en cualquier suspensión de un vehículo y que se añaden a propósito a los sistemas mecánicos para limitar o regular la vibración. El valor del coeficiente de amortiguación es un parámetro que se estudia en este proyecto como parte del sistema de aislamiento final, [25].

La constante de proporcionalidad “ ” recibe el nombre de coeficiente de amortiguamiento viscoso. Sus unidades en el Sistema Internacional son . Adams permite variar fácilmente los valores de amortiguamiento de un muelle, de forma que se puede comprobar la eficacia de los resultados que se obtengan. La pulsación propia del sistema depende de la masa, la amortiguación y la elasticidad del sistema. Por tanto este parámetro afectará a los resultados de elasticidad y amortiguación que se obtengan, pues la masa del sistema es invariable. Se puede definir un valor de amortiguamiento (), para el que el sistema deja de ser oscilante. A este valor se denomina coeficiente de amortiguamiento crítico. El coeficiente de amortiguamiento es el cociente entre el amortiguamiento del sistema y el amortiguamiento crítico. El comportamiento del sistema depende de que la cantidad del coeficiente de amortiguamiento sea positiva, nula o negativa. De ahí la importancia del valor de este coeficiente, pues en función de su valor el sistema tendrá tres tipos de solución distintas, [25]. En este sistema la vibración es subamortiguada, pues , el desplazamiento tiende a cero cuando crece el tiempo, pero oscila entre los límites fijados por las curvas de decrecimiento exponencial y - al ir tendiendo a cero. El movimiento es oscilatorio en el tiempo con una pulsación propia amortiguada . No es un movimiento con periodo en el sentido estricto puesto que el movimiento no se repite con la misma amplitud en cada periodo. Más adelante se comprobará que el cuadrúpedo, en el caso “sistema ideal”, se comporta de acuerdo con una oscilación subamortiguada.

La identificación del sistema consiste en obtener el tipo de movimiento oscilatorio, y la frecuencia natural del cuadrúpedo en el caso ideal. Para esta identificación, se analiza la trayectoria del centro de masas descrito por el torso a lo largo del tiempo. En función del tipo de curva obtenida se puede identificar el sistema. Las vibraciones mecánicas se clasifican en vibraciones libres y vibraciones forzadas. Por tanto el procedimiento que se va a usar para obtener la frecuencia natural del sistema (citado al inicio de este capítulo) es el análisis de la trayectoria descrita por el CM del torso del cuadrúpedo a lo largo del tiempo con la ayuda de Adams. Una vez arrancadas las simulaciones dinámicas en Adams, es posible obtener resultados de prácticamente todos los elementos del sistema. Ahora, el estudio se va a centrar en la posición del centro de masas del torso, debido a que es el elemento principal del que pretendemos atenuar las vibraciones. Para conocer las vibraciones del cuadrúpedo se ha usado Adams para obtener el movimiento del CM del torso en el espacio en la simulación del caso con vibraciones y del caso ideal. La diferencia de trayectorias entre estas dos simulaciones permite obtener el comportamiento del sistema debido a las vibraciones del motor. Una vez obtenidas los gráficos de los desplazamientos del torso para cada simulación y para el eje Y y el eje Z (ejes donde están aplicadas las fuerzas excitadoras), se realizan comparaciones entre el caso con vibraciones y el caso ideal. Después de analizar todos los resultados se comprueba que el gráfico donde mejor se pueden analizar los resultados es el que relaciona el eje Y en el salto, como ha sido descrito en el capítulo 5. Es difícil analizar las trayectorias de la vibración exclusivamente, puesto que estamos hablando de un sistema en movimiento y que no está fijo en el espacio. Precisamente por este problema, es necesario realizar distinciones entre trayectorias debidas a vibraciones o debidas al movimiento del sistema, para aproximar el cálculo de la frecuencia natural y obtener resultados más precisos.

La respuesta de un sistema de segundo orden, queda representada en la figura 48. Los conceptos y parámetros representados en dicha gráfica son perfectamente aplicables al caso de vibraciones de este cuadrúpedo en movimiento. La curva de la gráfica muestra que una vez alcanzado el punto más alto de la vibración, ésta no permanece constante en el tiempo, pues la amplitud de la vibración se va haciendo más pequeña conforme avanza el tiempo. Por eso este tipo de vibraciones son subamortiguadas. Los resultados obtenidos en el capítulo 5 tienen ahora un especial interés. Con las curvas obtenidas en ese capítulo se puede aislar la vibración debida a las fuerzas externas aplicadas.

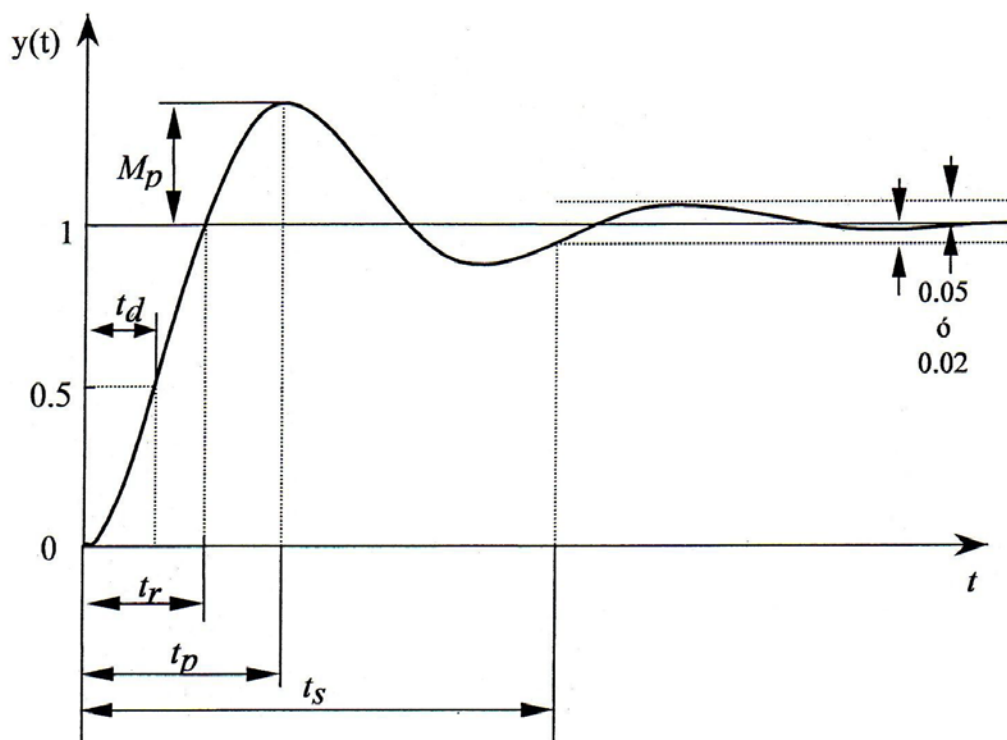
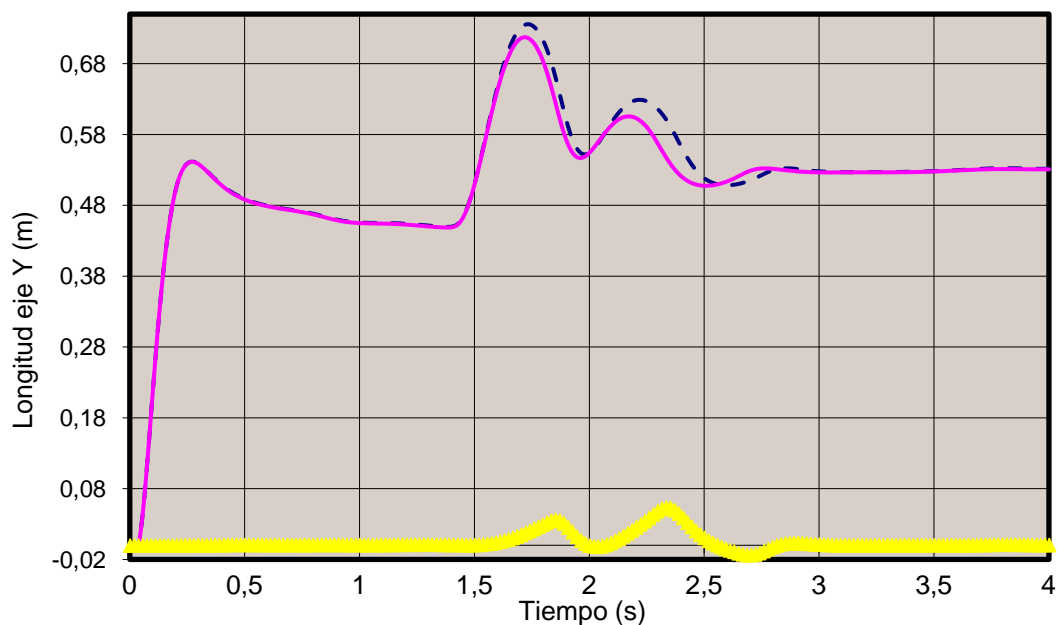


Figura 48. Respuesta de un sistema de segundo orden

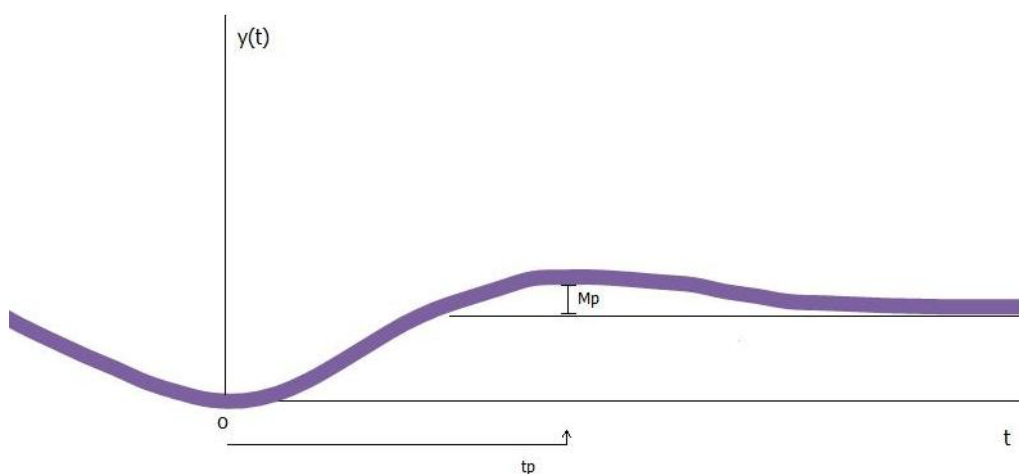
Si a la trayectoria del centro de masas del torso en el caso con fuerzas externas aplicadas, se le sustrae la trayectoria del centro de masas del torso en el caso sin fuerzas externas aplicadas, el resultado es una curva que define el comportamiento de las vibraciones del torso por el efecto de esas fuerzas. Esta operación puede llevarse a cabo para cada análisis de las trayectorias, realizadas en el capítulo 5. En definitiva, el análisis que se va a desarrollar en este capítulo corresponde a la diferencia de trayectorias en el salto correspondiente al eje Y, pues es el caso que presenta resultados más interesantes, [26].

La figura 49 a) corresponde a la gráfica de resultados de la figura 34 del capítulo 5. Se aplica el filtro definido en la figura 37 a las curvas de las trayectorias. Con el filtro aplicado, el aspecto de las curvas obtenidas muestra que nos encontramos con un sistema de segundo orden subamortiguado, que se corresponde a la figura 49. La curva de color amarillo que aparece paralela al eje X pero con dos picos, es el resultado de sustraer a los valores de la curva de la trayectoria del CM del torso en el eje Y en el caso con fuerzas, los valores de la trayectoria del CM del torso en el eje Y en el caso sin fuerzas, para la simulación del salto. A primera vista, la curva amarilla tiene dos claros picos correspondientes a la diferencia de trayectorias, y después alcanza la estabilidad progresivamente. Es lógico pensar que el punto de estudio idóneo es la mayor diferencia de alturas que se observa en el segundo pico. Esto sería así si el sistema fuera fijo en el espacio y si describiera trayectorias idénticas en los dos casos, pero esto no es del todo cierto, dado que el segundo pico es debido a un rebote y el primero al salto propio de la simulación, es preferible no usar estos puntos para calcular la frecuencia. El punto idóneo es a partir del rebote cuando empieza la estabilidad. En ese punto se aprecia más el efecto de la vibración, pues consideramos que esa parte de la gráfica (valle cercano al segundo 3) es debida mucho más a las vibraciones que a la simulación del salto en sí. En la figura 49 b) se representa una ampliación de la oscilación en este punto. En dicho gráfico aparecen los parámetros necesarios para definir la respuesta de un sistema de segundo orden, de acuerdo con el gráfico de la figura 48. Como puede verse, se ha introducido un eje

de coordenadas en el punto más bajo de la curva (valle), pues es necesario considerar el inicio de la oscilación en ese punto y no al principio de la simulación. Ahora es posible aproximar la frecuencia natural de vibración del sistema ideal, con ayuda de los conceptos que aparecen en el gráfico 48. Por la forma de la gráfica 49 b), se sabe que este sistema se comporta como un sistema subamortiguado, pues la amplitud de la oscilación se hace más pequeña a medida que avanza el tiempo al principio de este capítulo. Gracias a la curva de vibraciones aislada que se obtiene en la figura 49 a), es posible relacionar esta vibración mecánica con la respuesta de una vibración de segundo orden como el descrito en la figura 48. Los datos extraídos de la figura 49 b) son , y . De esta manera, con el tiempo pico y la sobreoscilación media, es posible calcular la frecuencia propia angular del sistema y por consiguiente la frecuencia natural del mismo:



a)



b)

Figura 49. Trayectorias en el eje Y, del centro de masas del torso en el salto:
a) vibración aislada mediante la diferencia de las curvas en los casos con fuerza y sin fuerza,
b) ampliación de la oscilación de la vibración aislada en $t=2,5$ s



— — —

— —

(3)

==

—

—

—

(4)

De 3 y 4 se puede obtener:

— — —

Se sabe que para un sistema subamortiguado

(5)

—

(6)

Se conoce la frecuencia amortiguada y la constante de amortiguamiento .

—

—

—

Por lo que la frecuencia propia angular

La frecuencia natural del sistema:

— —

6.2 – Obtención del amortiguamiento y rigidez del sistema de aislamiento:

A continuación se analiza el sistema para obtener los valores de y poder diseñar un sistema de aislamiento de vibraciones entre el torso del cuadrúpedo y el conjunto motor. Se han realizado cálculos para aproximar la vibración natural del sistema en el caso ideal, cuyo valor ronda los 5,1 Hz. Por tanto el sistema que diseñemos deberá oscilar con una frecuencia igual o menor de 5,1 Hz. Por otra parte, a la hora de diseñar sistemas de aislamiento, se debe intentar absorber las vibraciones de manera que la frecuencia de excitación sea el doble que la frecuencia natural del sistema, [27]. El objetivo es hallar una constante de rigidez y un coeficiente de amortiguamiento , con la frecuencia natural del sistema obtenida, no se puede calcular, pues al introducir un muelle y un amortiguador, las condiciones de vibración cambian. La frecuencia natural calculada, sirve para diseñar un aislante que tenga una rigidez y amortiguación que haga que el sistema vibre con una frecuencia natural de 5,1 Hz.

En primer lugar es necesario analizar el tipo de vibración que experimenta el sistema. En principio se trata de un cuadrúpedo que se desplaza a lo largo de una superficie horizontal que posee un motor en la parte superior de su torso, el cual vibra con fuerza excitadora del tipo $P_0 \sin \Omega t$, y es necesario introducir un sistema aislante para atenuar las vibraciones que provoca este motor. Por tanto, el sistema oscila de acuerdo con una vibración forzada amortiguada. La ecuación del movimiento del sistema, resultado de aplicar la segunda ley de Newton a la masa que figura en el gráfico 50 es de segundo orden, no homogénea y de coeficientes constantes. La solución general de la ecuación es la suma de una solución particular que satisface la ecuación diferencial y una solución complementaria que satisface la parte homogénea de la ecuación diferencial, [25]. La solución complementaria viene dada según el valor del coeficiente de amortiguamiento ζ , dependiendo de si es mayor, igual o menor que la unidad. En este caso el sistema es subamortiguado, por lo que ζ es menor que uno. Hay que tener en cuenta que ningún sistema real está totalmente exento de rozamientos. Por tanto, la solución complementaria irá disminuyendo en el transcurso del tiempo. Como esta solución es apreciable durante un tiempo corto a partir del inicio del movimiento, recibe el nombre de solución transitoria. Como la amplitud de la solución particular es constante, a dicha solución se le da el nombre de vibración permanente. En resumen, la solución total consta de dos vibraciones superpuestas. En el caso de sistemas subamortiguados el desplazamiento es

(7)

El primer término de la ecuación representa una vibración libre del sistema. Su frecuencia sólo depende de las propiedades del sistema (rigidez k , amortiguamiento c , y la masa m) y no depende de la fuerza perturbadora. La amplitud de la vibración libre (o transitoria) disminuye en el transcurso del tiempo a causa de las fuerzas amortiguadoras. El segundo término de la ecuación, representa una vibración permanente del sistema, y es la parte de la ecuación que suele tener interés primordial. La frecuencia de la vibración permanente es igual a la de la fuerza excitadora aplicada, y su amplitud depende del cociente

ζ . El cálculo se centra en la vibración permanente del sistema, pues la vibración natural del sistema desaparece a lo largo del tiempo y lo que interesa es atenuar la vibración permanente. Los datos de entrada son:

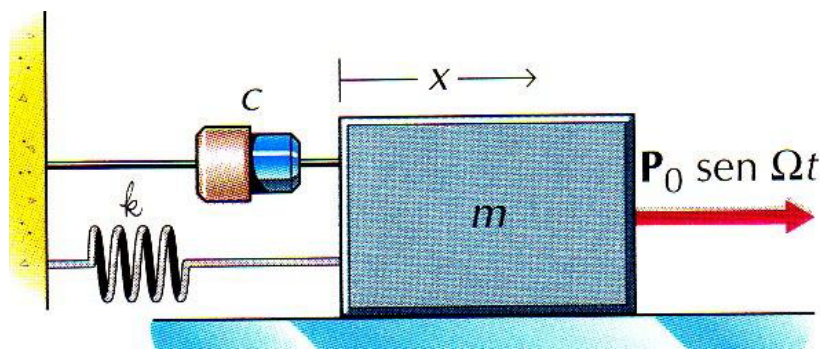


Figura 50. Ejemplo de aplicación de la fuerza excitadora, [25].



La fuerza excitadora tiene una frecuencia de 300 rad/s y la vibración natural es de 5,1 Hz cuando el sistema no tiene aislante. Evidentemente al introducir un muelle y un amortiguador en el robot, la frecuencia natural del sistema varía y es un dato que se desconoce. La frecuencia de 5,1 Hz que se obtuvo en la oscilación libre sirve para saber cómo oscila el sistema con aislante incluido, es decir, como la oscilación ideal es de 5 Hz, se supone que cuando se instale el sistema tendrá una frecuencia de 5 Hz y será la frecuencia de la vibración transmitida. Se desconoce entonces la frecuencia natural de este sistema si hay aislante, parámetro que es necesario estimar. Cuando se diseña la frecuencia propia de un sistema aislante, debe ser por lo menos dos veces menor que la frecuencia de la fuerza aplicada: — Se va a suponer que la relación de frecuencias es 2, entonces:

En resumen, las frecuencias del sistema son:

- a) *Frecuencia de la fuerza excitadora*
- b) *Frecuencia natural del sistema*
- c) *Frecuencia transmitida*

Según la ecuación 6 y tomando y se obtiene:

Con este dato se puede calcular la frecuencia natural del sistema y por consiguiente la constante de rigidez del muelle:

$$\frac{K}{m} = \omega_n^2 \quad (9)$$

El coeficiente de amortiguamiento crítico también sirve para calcular la amortiguación:

$$\frac{C}{2m\omega_n} = \zeta \quad (10)$$

$$\frac{C}{2m\omega_n} = \zeta \quad (11)$$

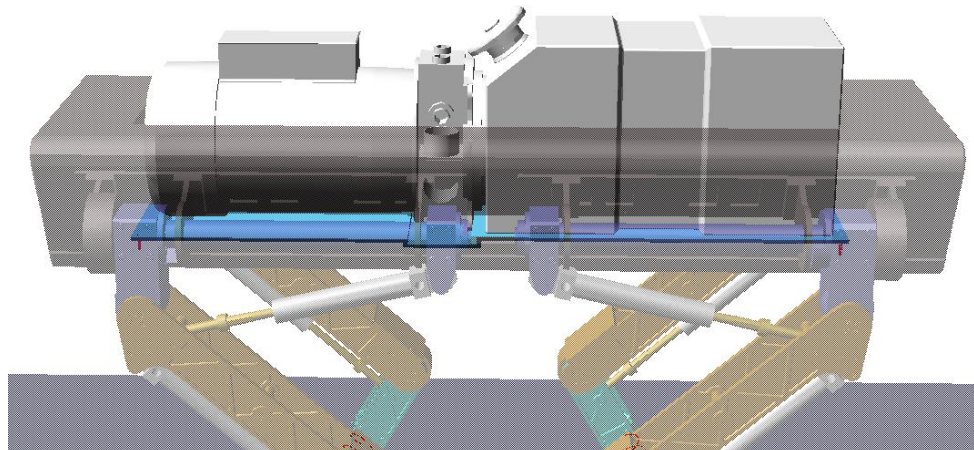
De (10) y (11) y con los valores calculados anteriormente se obtiene:

Valores de K y C del aislamiento propuesto:

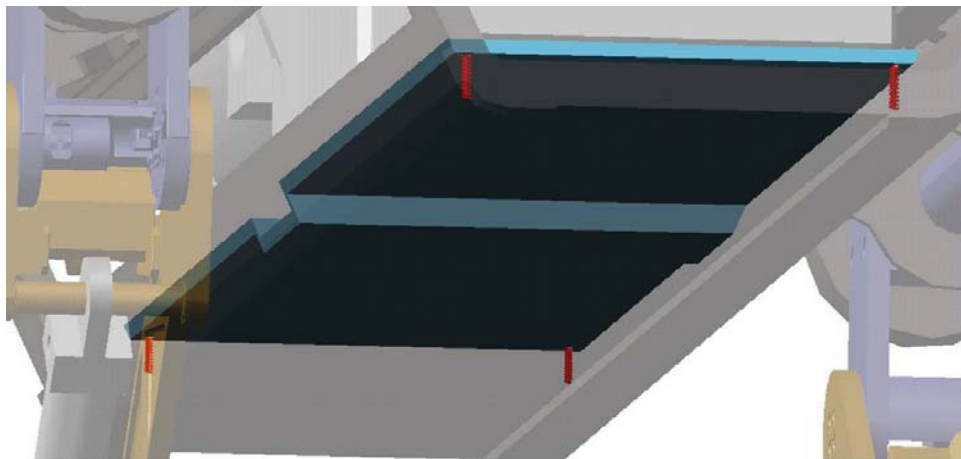
Con estos datos, la amplitud de la vibración permanente es:

$$\frac{X}{X_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}}$$

Lo que supone una amplitud máxima de menos de medio milímetro.



a)



b)

Figura 51. Montaje del aislante en Adams: a) vista lateral del montaje de la placa y los muelles, b) vista global del montaje de la placa y los muelles

6.3 – Modelado del sistema en Adams:

Es momento de aplicar estos valores a un elemento real. Se propone usar una placa que soporte al motor y que esté suspendida sobre 4 amortiguadores-muelles encima del torso. Los valores de rigidez y amortiguación, , que tiene el sistema, deben ser repartidos entre los 4 muelles:

La imagen de la figura 51 a), muestra una vista lateral del montaje del sistema de aislamiento. La placa antivibraciones se ha diseñado en Solid Edge. Tiene las dimensiones mínimas para soportar al conjunto motor: 167 mm de ancho, 805 mm de largo, 5 mm de espesor, y los taladros para los amortiguadores son de diámetro 5 mm. La imagen de la figura



51 b) muestra una vista global del montaje de la placa. Los amortiguadores se colocan en los extremos de la placa, para intentar que las vibraciones se repartan de manera uniforme sobre el torso. El motor está atornillado sobre la placa antivibraciones. La placa lleva 4 muelles amortiguadores en sus extremos sobre el torso. Los muelles se introducen indicando en Adams dos puntos, uno en cada pieza entre las que actúa el muelle. Así se indica la dirección en la que actuarán estos elementos. Después se introducen los valores deseados de rigidez, amortiguación, incluso precarga si fuera necesario. Cabe destacar, la existencia de una junta traslacional entre el torso y el motor, orientada en el sentido positivo del eje Y. Esto supone una gran simplificación de nuestro modelo, pues de esa manera la junta restringe el movimiento del conjunto motor en otras direcciones y lo libera en el eje Y. Así se consigue una mayor aproximación a las ecuaciones usadas en anteriores capítulos, aplicadas en casos de un grado de libertad. Se tiene el torso y sobre él, la placa. La placa está atornillada al conjunto motor y por eso se moverá solidario a él. En Adams se usa un candado para restringir los movimientos relativos entre el conjunto motor y la placa. Entre la placa y el torso se disponen los 4 muelles.

Capítulo 7

Validación numérica del sistema de aislamiento

En este capítulo se analiza la efectividad del aislante diseñado en el capítulo 6. En definitiva se trata de utilizar las herramientas de cálculos y resultados de Adams para comparar los desplazamientos, fuerzas y pares que se obtienen al instalar el aislante elegido. Partiendo de los datos del capítulo 5, que relacionan las simulaciones ideales con las que poseen fuerzas excitadoras, añadimos gráficas que nos permitan establecer el grado de utilidad de nuestros cálculos.

7.1 - Salto:

La figura 52, compara las trayectorias en el eje Y del centro de masas del torso, en la simulación del robot saltando. La gráfica está formada por la curva de color rojo en línea continua que representa la simulación con aislante, la curva de color azul en línea discontinua que representa la simulación con fuerzas externas y sin aislante, y la curva de color negro en línea de puntos y rayas que representa la simulación en el caso ideal. La gráfica muestra que en el caso ideal y el caso en el que se usa aislante de vibraciones, las curvas de desplazamiento en el eje Y son muy parecidas. Esto significa que el aislante en este caso es efectivo, pues el efecto de las vibraciones que describe la curva azul (simulación con fuerzas y sin aislante) se ve atenuado por el aislante. Por el momento el aislante elegido tiene efectos positivos en el movimiento del cuadrúpedo. Se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas.

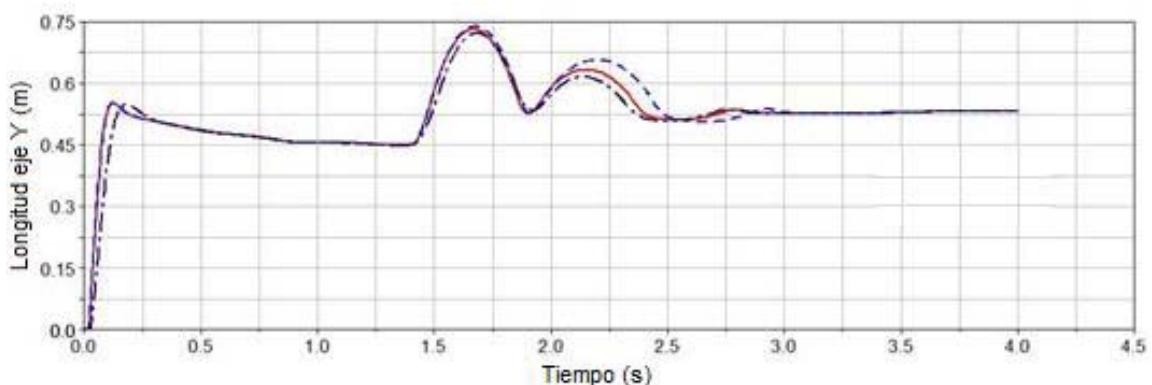


Figura 52. Representación de la trayectoria del CM del torso para la simulación del salto en el eje Y, comparando los casos: ideal, con fuerzas externas, y con aislante aplicado

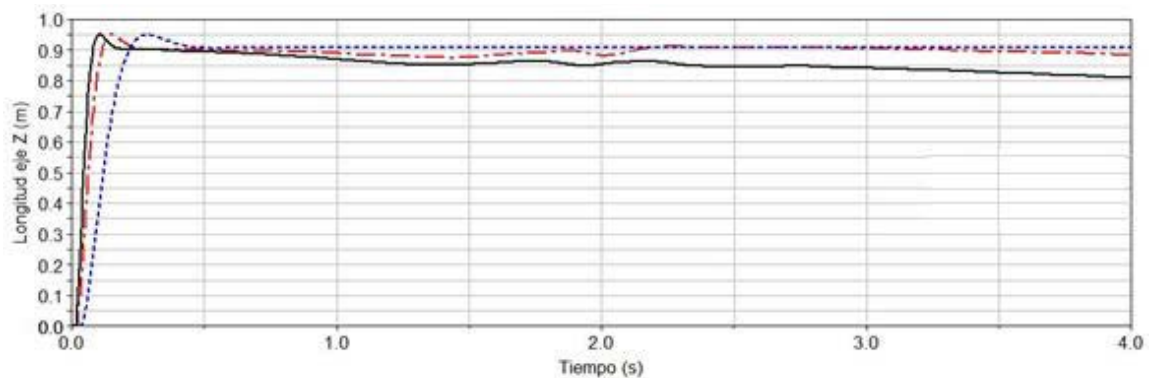


Figura 53. Representación de la trayectoria del CM del torso para la simulación del salto en el eje Z, comparando los casos: ideal, con fuerzas externas, y con aislante aplicado

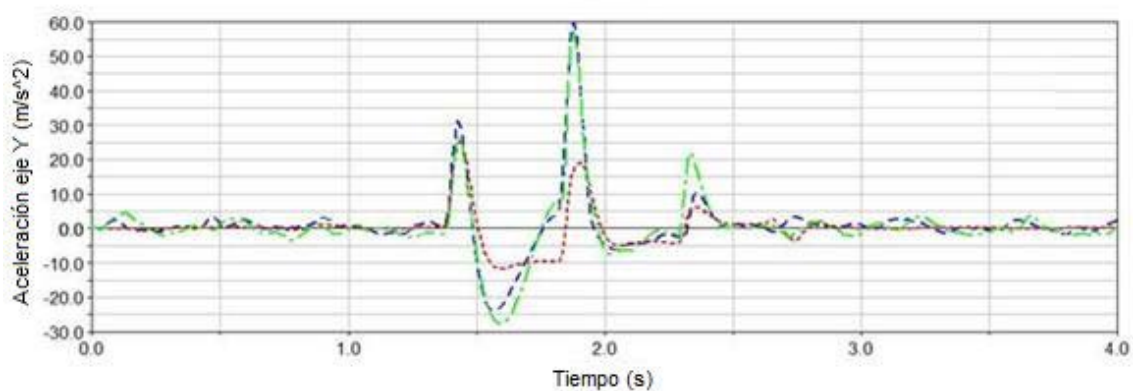


Figura 54. Representación de la evolución temporal de la aceleración del torso en el eje Y

La figura 53 muestra resultados del mismo análisis que el gráfico de figura 52 pero para el eje Z, es decir, compara las trayectorias en el eje Z del centro de masas del torso en la simulación del robot saltando. La gráfica está formada por la curva de color rojo en línea de puntos y rayas que representa la simulación con aislante, la curva de color azul en línea discontinua que representa la simulación del caso ideal y la curva de color negro en línea continua que representa la simulación en el caso con fuerzas externas y sin aislante. La curva del caso ideal es una línea recta lo que significa que el salto se realiza en línea recta paralela al eje Z. Cuando actúan las fuerzas excitadoras (curva negra) se aprecia una evidente desviación, lo que provoca un giro en el salto. El efecto del aislante no puede evitar la desviación por completo pero sí se nota una proximidad notable al caso ideal, es decir, el aislante mejora los resultados de las vibraciones, porque aproxima la trayectoria a la que describe el robot en el caso ideal. Se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas. Por eso hay que concluir que el uso del aislante es útil y efectivo. La figura 54 muestra una gráfica con las aceleraciones que describe el CM del torso en el eje Y, en la simulación del salto. En color rojo y línea de puntos se representa la aceleración en el caso ideal, en color azul y línea de rayas se representa la aceleración del caso sin aislante y con fuerzas, y en color verde el caso con aislante. Se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas. La curva azul (caso sin fuerzas) de la simulación sin aislante describe aceleraciones más amplias y de mayor frecuencia. Es notable el efecto de las fuerzas excitadoras en los dos casos en los que actúan (con y sin aislante). En general el aislante reduce las vibraciones, sobre todo cuando el torso está en reposo.

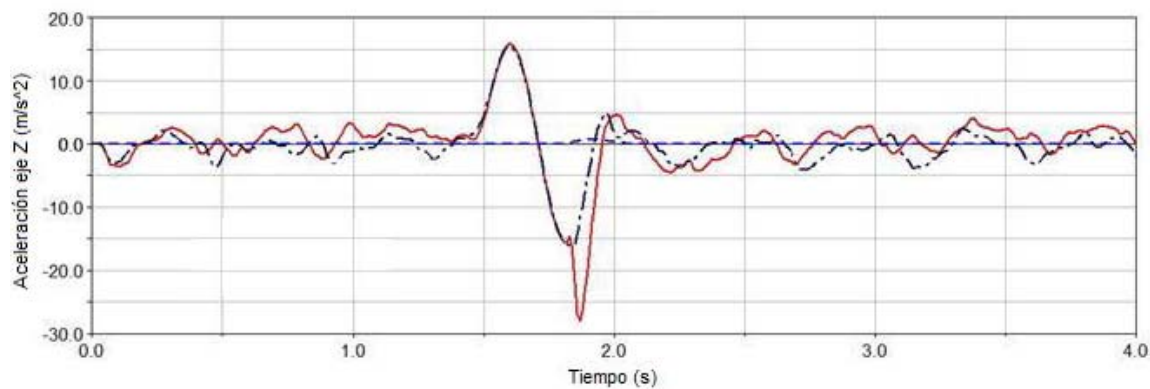


Figura 55. Representación de la evolución temporal de la aceleración del torso en el eje Z

La figura 55 muestra una gráfica con las aceleraciones que describe el CM del torso en el eje Z en la simulación del salto. En color rojo y línea continua se representa la aceleración en el caso sin aislante y con fuerzas, en color azul y línea de rayas se representa la aceleración del caso ideal y en color negro y línea de puntos y rayas, el caso con aislante. Se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas. La curva roja (caso sin aislante) describe aceleraciones más amplias y de mayor frecuencia, que en el caso con aislante (curva negra). En el caso ideal en el que no actúan fuerzas hay aceleraciones muy pequeñas. Aunque el efecto del aislante no es determinante en la simulación, se puede apreciar una cierta proximidad de la curva del aislante a la curva del caso ideal. Esto significa que las aceleraciones serán menores y próximas a las del caso ideal y por eso el aislante de vibraciones reduce las aceleraciones. La trayectoria que describe el centro de masas del torso cuando se usa aislante es muy parecida a la que describe en el caso ideal, por lo que puede decirse que el uso del aislante en esta simulación es útil.

7.2 - Resultados caminando:

La gráfica de la figura 56, compara las trayectorias en el eje Y del centro de masas del torso, en la simulación del robot caminando. La gráfica está formada por la curva de color rojo en línea de puntos y rayas que representa la simulación con aislante, la curva de color verde en línea continua que representa la simulación con fuerzas externas y sin aislante, y la curva de color azul en línea de rayas que representa la simulación en el caso ideal. La gráfica muestra que en el caso ideal y el caso en el que se usa aislante de vibraciones las curvas de desplazamiento en el eje Y son muy parecidas. Esto significa que el aislante es efectivo, pues el efecto de las vibraciones que describe la curva verde (simulación con fuerzas y sin aislante) se ve atenuado por el aislante. Se usa el filtro de la figura 37 para la representación de las tres curvas. Cabe destacar que alrededor del segundo 5,5 el caso ideal representa un pico antes que los otros casos. Puede ser debido al efecto de las fuerzas (pues de las tres simulaciones es la única que no tiene fuerzas excitadoras). La gráfica de la figura 57, compara las trayectorias en el eje Y del centro de masas del torso, en la simulación del robot caminando. La curva que describe el CM del torso en el caso ideal (color azul y línea discontinua) refleja que el cuadrúpedo no camina en línea recta, pues el propio balanceo en el movimiento no lo permite. Claramente se observa una mayor desviación de la trayectoria cuando se aplican al sistema las fuerzas excitadoras. Por eso el cuadrúpedo gira hacia la derecha cuando avanza. Cuando se instala el aislante (curva roja y línea de puntos y rayas), el cuadrúpedo se desplaza siguiendo una trayectoria muy parecida a la del caso ideal, y aunque se observa cierta desviación, es notorio que se reduce bastante el efecto de las fuerzas externas aplicadas. La curva del caso

sin aislante pero con fuerzas externas indica una desviación considerable de la trayectoria original, como se indicó en el capítulo 5. El análisis de las trayectorias en esta simulación invita a pensar que el sistema aislante propuesto tiene efectos positivos en el desplazamiento del cuadrúpedo. Se usa el filtro de la figura 37 para la representación de las tres curvas. La figura 58 muestra una gráfica con las aceleraciones que describe el CM del torso en el eje Y, en la simulación caminando. En color rojo y línea de puntos y rayas se representa la aceleración en el caso con aislante, en color azul y línea de rayas se representa la aceleración del caso ideal, y en color verde el caso sin aislante y con fuerzas. Se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas. La curva verde (caso sin aislante) describe aceleraciones más amplias y de mayor frecuencia, y presenta varios picos aislados de aceleración, lo cual puede originar movimientos bruscos en la simulación, porque significa aceleraciones más grandes y más frecuentes en el tiempo. Es notable el efecto de las fuerzas excitadoras en los dos casos en los que actúan (con y sin aislante). La curva roja (caso con aislante) presenta aceleraciones menores. No se pueden establecer grandes analogías con el caso ideal, pues no están actuando fuerzas externas alternantes como en los otros casos. De cualquier modo los resultados parecen aceptables, pues en el fondo se aprecia una disminución de los picos de aceleración y su frecuencia al usar el aislante.

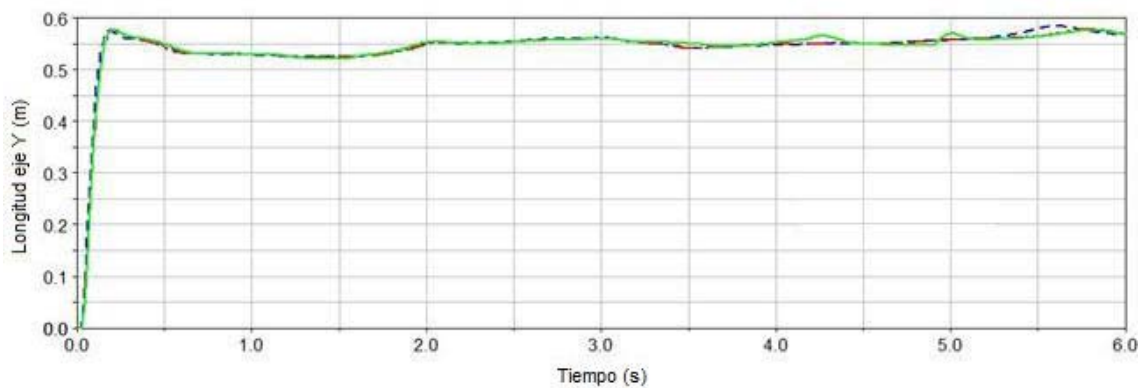


Figura 56. Representación de la trayectoria del CM del torso para la simulación caminando en el eje Y, comparando los casos: ideal, con fuerzas externas, y con aislante aplicado

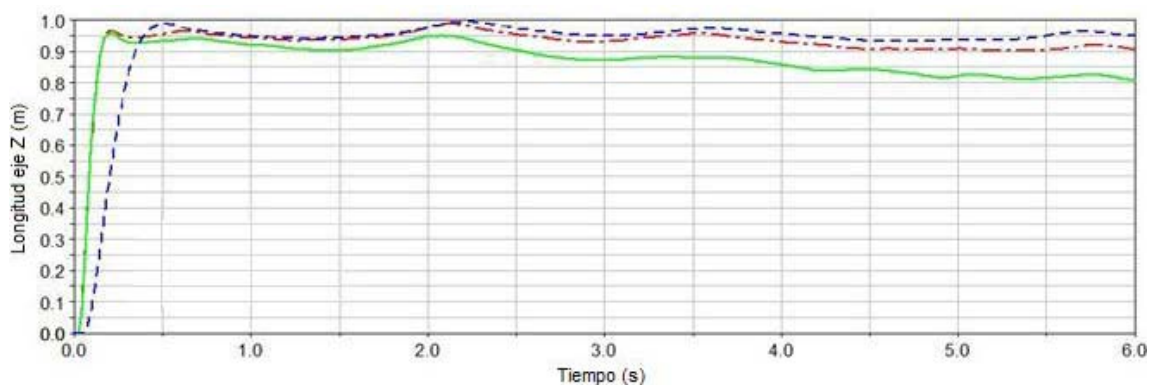


Figura 57. Representación de la trayectoria del CM del torso para la simulación caminando en el eje Z, comparando los casos: ideal, con fuerzas externas, y con aislante aplicado

La figura 59 muestra una gráfica con las aceleraciones que describe el CM del torso en el eje Z, en la simulación del robot caminando. El código de colores equivale al del anterior gráfico. Al igual que en el eje Y, la curva de aceleraciones en el caso ideal presenta pocas alteraciones, por la falta de fuerzas excitadoras en la simulación ideal. En cuanto a la curva del caso con aislante, no muestra excesivas diferencias con el caso sin aislante, al menos en cuanto a la amplitud se refiere, pero se pueden contar menos picos con aislante, lo cual significa que el número de aceleraciones (podemos hablar de movimientos bruscos) es menor. Se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas.

7.3 - Resultados corriendo:

Las siguientes gráficas analizan los resultados del sistema en la simulación de la carrera. Al igual que en los puntos anteriores, se estudian los desplazamientos y aceleraciones en los ejes Y y Z, pues en ellos se aplicaron las fuerzas excitadoras. La gráfica de la figura 60, compara las trayectorias en el eje Y del centro de masas del torso, en la simulación del robot en carrera. La gráfica está formada por la curva de color rojo en línea continua que representa la simulación con aislante, la curva de color azul en línea discontinua que representa la simulación con fuerzas externas y sin aislante, y la curva de color rosa en línea de puntos que representa la simulación en el caso ideal. La gráfica muestra que en el caso ideal y el caso en el que se usa aislante de vibraciones las curvas de desplazamiento en el eje Y son muy parecidas. En casi toda la gráfica las dos curvas recorren trayectorias casi iguales, pero no se puede decir lo mismo del caso sin aislante (azul), pues muestra alteraciones notables respecto de las otras dos.

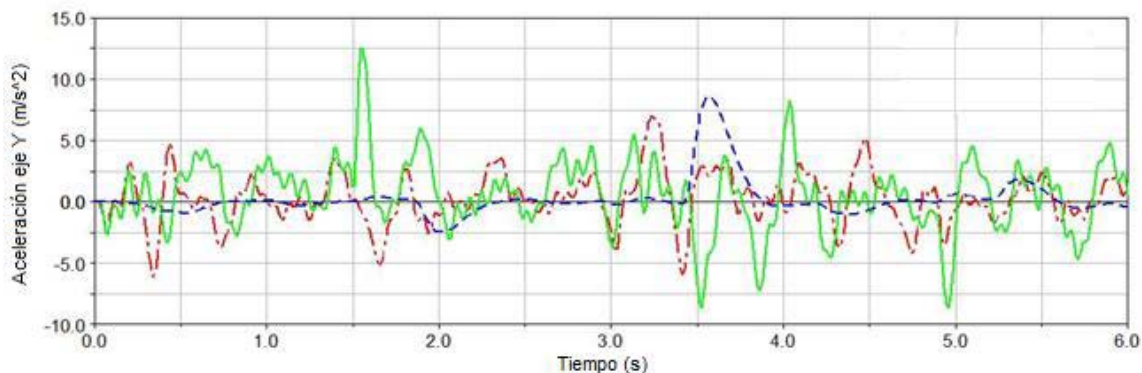


Figura 58. Representación de la evolución temporal de la aceleración del torso en el eje Y

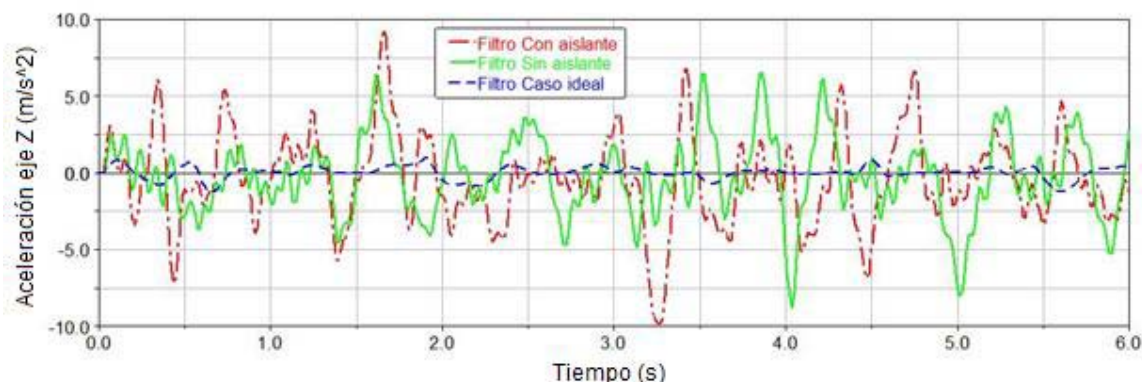


Figura 59. Representación de la evolución temporal de la aceleración del torso en el eje Z

Hay que destacar que hay algunos puntos donde la curva del caso sin aislante describe una trayectoria distinta a las curvas de los otros casos. Principalmente en torno a $t=0,3$ s y $t=1$ s. Por otra parte las trayectorias de los tres casos son parecidas, pues si nos fijamos en el eje Y, el orden de las variaciones entre las curvas es de unas 5 milésimas más o menos. Esto supone diferencias muy pequeñas y significa que en esta simulación, el efecto de las fuerzas externas no es muy grande y no afecta mucho a los movimientos del cuadrúpedo. Es posible que cuanto más rápido sea el movimiento del sistema, menor es el efecto que provocan las fuerzas. Esto significa que el aislante en este caso es efectivo, pues el efecto de las vibraciones que describe la curva azul (simulación con fuerzas y sin aislante) se ve atenuado por el aislante. En esta figura se sigue comprobando que el aislante elegido tiene efectos positivos en el movimiento del cuadrúpedo. No se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas, pues en este caso la visualización de los resultados es mejor sin usar el filtro. La gráfica de la figura 61, compara las trayectorias en el eje Z del centro de masas del torso, en la simulación del robot en carrera. La gráfica está formada por la curva de color rojo en línea continua que representa la simulación con aislante, la curva de color azul en línea discontinua que representa la simulación con fuerzas externas y sin aislante, y la curva de color rosa en línea de puntos que representa la simulación en el caso ideal. A primera vista se aprecia una gran diferencia de la curva sin aislante con el resto, pero en realidad la desviación es de menos de 2 cm. Es una distancia que se considera pequeña pues es imposible que en los tres casos se describan trayectorias iguales.

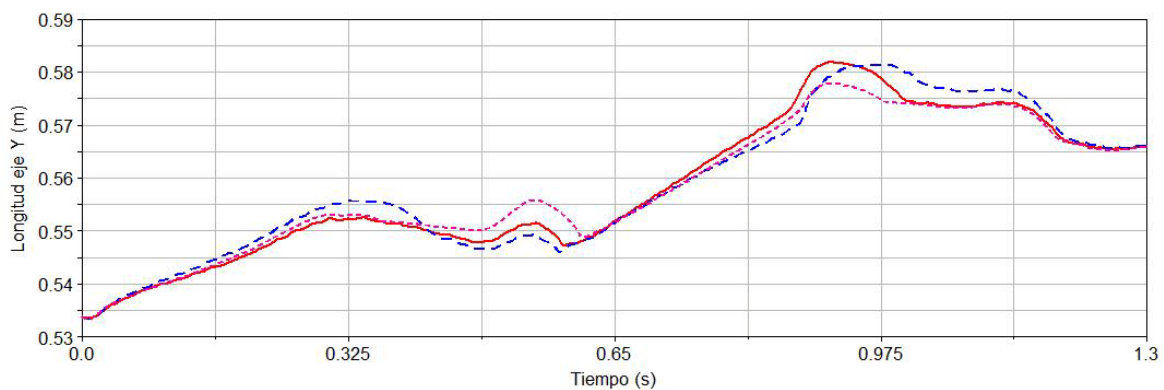


Figura 60. Representación de la trayectoria del CM del torso para la simulación en carrera, en el eje Y, comparando los casos: ideal, con fuerzas externas, y con aislante aplicado

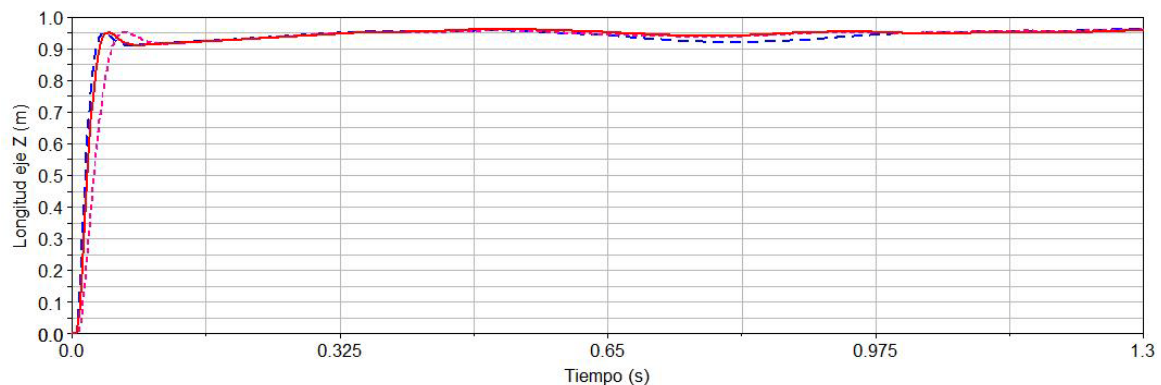


Figura 61. Representación de la trayectoria del CM del torso para la simulación en carrera, en el eje Z, comparando los casos: ideal, con fuerzas externas, y con aislante aplicado

Se usa el filtro de la figura 37 para la representación de las tres curvas, pues en este caso la visualización de los resultados es mejor sin usar el filtro. Cabe destacar que el aislante hace una buena función pues las trayectorias del caso ideal y con aislante se parecen mucho, evitando así grandes desviaciones por el efecto de las fuerzas. Prácticamente no se aprecian diferencias entre las 3 curvas salvo en $t=0,7$ s. Puede concluirse que tanto para el eje Y como para el eje Z, las diferencias entre las curvas son muy pequeñas y las trayectorias descritas por el centro de masas son prácticamente las mismas. La figura 62 muestra una gráfica con las aceleraciones que describe el CM del torso en el eje Y, en la simulación corriendo. En color rojo y línea de puntos y rayas se representa la aceleración en el caso con aislante, en color azul y línea continua se representa la aceleración del caso sin aislante, y en color morado y línea de rayas el caso sin aislante y con fuerzas. Se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas. La curva azul (caso sin aislante) describe aceleraciones más amplias y de mayor frecuencia, y presenta 3 picos aislados de aceleración, lo cual puede originar movimientos bruscos en la simulación, porque significa aceleraciones más grandes y más frecuentes en el tiempo. Los efectos que generan las fuerzas vibradoras, tienen una mayor presencia sobre la aceleración en esta simulación. La curva roja (caso con aislante) presenta aceleraciones menores. No se pueden establecer grandes analogías con el caso ideal, pues no están actuando fuerzas externas alternantes como en los otros casos. De cualquier modo los resultados parecen aceptables, pues en el fondo se aprecia una disminución de los picos de aceleración y su frecuencia al usar el aislante, aproximando los valores de la simulación con aislante a la del caso ideal. Cabe destacar que el aislante, representado por la curva roja, atenúa las aceleraciones en las zonas estables y en los picos. El pico en $t=0,3$ s. que se representa en el caso aislado puede ser debido a un rebote en la simulación, pero no parece tener efecto en los desplazamientos en el eje Y, a tenor de lo visto en la gráfica correspondiente. La figura 63 muestra una gráfica con las aceleraciones que describe el CM del torso en el eje Y, en la simulación corriendo. En color rojo y continua se representa la aceleración en el caso con aislante, en color azul y rayas se representa la aceleración del caso sin aislante, y en color morado y línea de puntos el caso sin aislante y con fuerzas. Se ha usado el filtro descrito en la figura 37 para la representación de las tres curvas. En esta gráfica, las aceleraciones de los casos con y sin aislante son muy parecidas, ligeramente menores con el aislante. Difieren mucho del ideal porque en el caso ideal no hay fuerzas excitadoras, sólo las inercias propias del movimiento. En cualquier caso son aceleraciones muy pequeñas, de menos de 5 m/s^2 . El pico que se observa en el caso ideal es un valor atípico y no debe ser tenido en cuenta, pues puede deberse a un error o algún movimiento del sistema. En general puede decirse que el aislante aproxima los valores de la simulación del robot con aislante a la simulación del caso ideal, y por eso, aunque no se pueden aislar las vibraciones completamente, si se pueden atenuar en cierta medida.

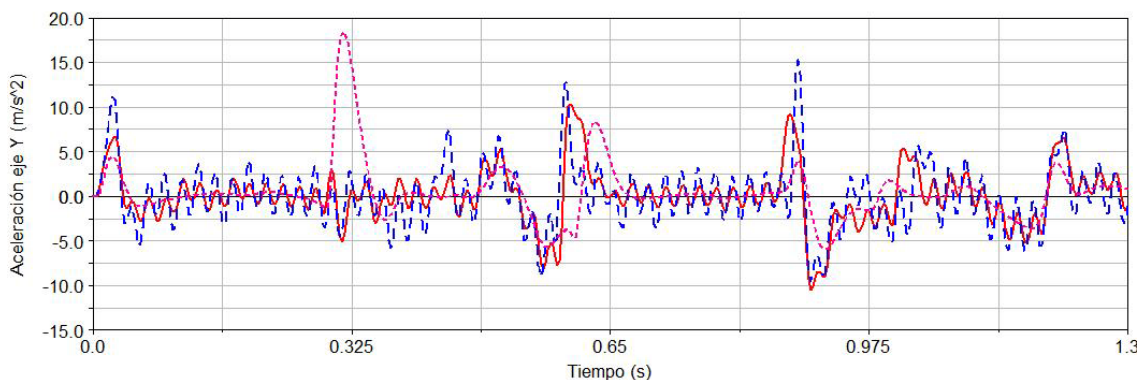


Figura 62. Representación de la evolución temporal de la aceleración del torso en el eje Y

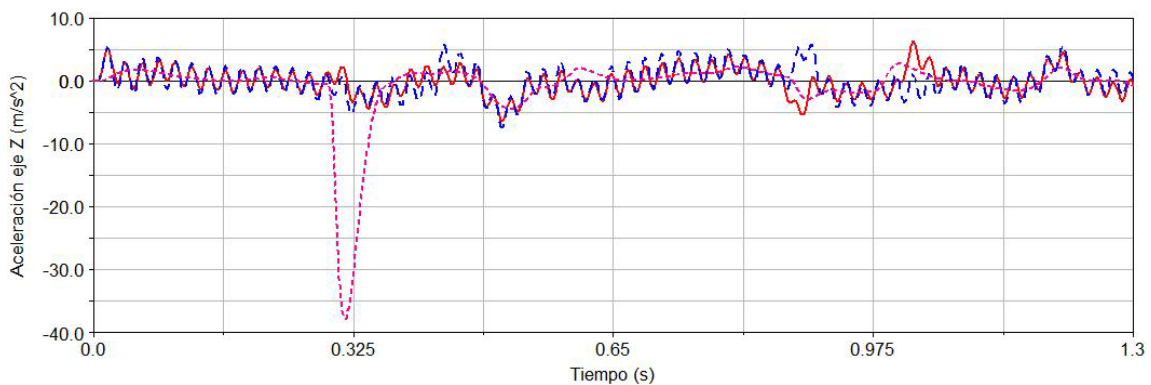


Figura 63. Representación de la evolución temporal de la aceleración del torso en el eje Z

7.4 - Análisis mecánico de los resultados:

Se han realizado análisis gráficos de los resultados de las simulaciones dinámicas realizadas en Adams utilizando los valores de rigidez y amortiguación calculados en el capítulo 6. Es necesario saber si los resultados obtenidos son válidos. En primer lugar aparece un nuevo concepto: la deformación que sufriría el resorte si se le aplicara estáticamente la fuerza se puede expresar con la ecuación:

(10)

El Factor de Amplificación Dinámico (F.D.A.) es el cociente entre la amplitud de la vibración permanente y la deformación debida a . Este factor representa el número de veces que la magnitud de la oscilación dinámica es mayor que la deformación estática.

(11)

Además se puede establecer una relación entre la frecuencia de la fuerza excitadora y la frecuencia natural del sistema:

(12)

La variación de la respuesta en función de este cociente es:

(13)

La figura 64 representa la relación entre el factor y la respuesta . En este caso para una relación de frecuencias y un coeficiente de amortiguamiento , se obtiene un desfase de -52° , esto es, 128° . Esto significa que cuando se aplica una fuerza perturbadora a frecuencias altas , la respuesta está en su mayor parte en oposición de fase con la fuerza perturbadora. La figura 65 analiza la variación de F.D.A. en función de y , donde es el coeficiente de amortiguación. Cuando la frecuencia excitadora es próxima a la frecuencia natural del sistema y el amortiguamiento es bajo, la amplitud de la respuesta tiende a ser muy grande, se dice que el sistema entra en resonancia. En general para excitaciones exteriores

con frecuencias inferiores a la mitad de la frecuencia natural del sistema, la amplitud de la vibración será del mismo orden que la deflexión estática, esto es, valores de F.D.A. próximos a 1. Cuando la frecuencia excitadora dobla a la frecuencia de la fuerza natural (como es el caso), casi no existe desplazamiento y el sistema apenas vibra. El F.D.A. tiene un valor de 0,2034 que también puede comprobarse en la figura 65, por lo que efectivamente este sistema de aislamiento de vibraciones propuesto cumple su función.

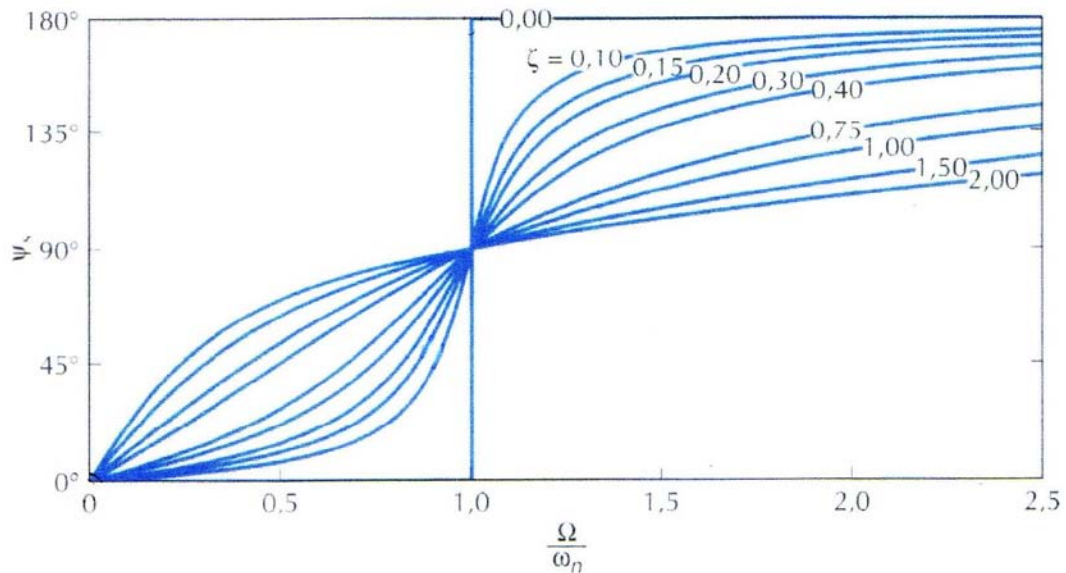


Figura 64. Variación de la respuesta en función de

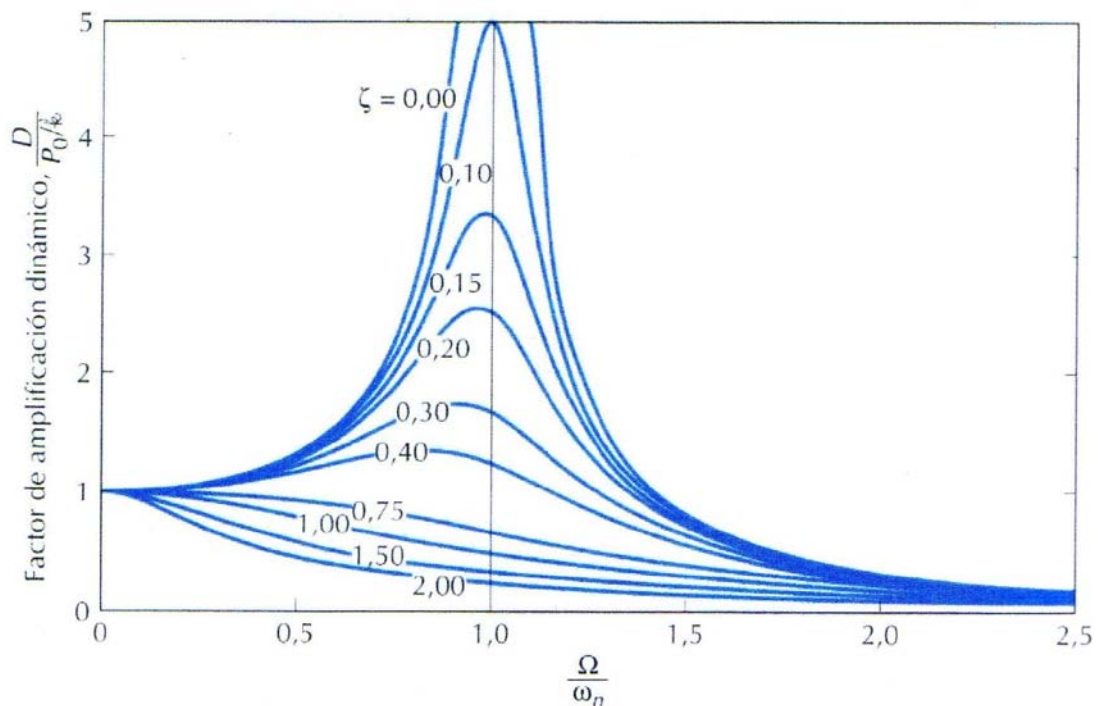


Figura 65. Variación del factor de amplificación dinámico en función de la relación de frecuencias y el coeficiente de amortiguación

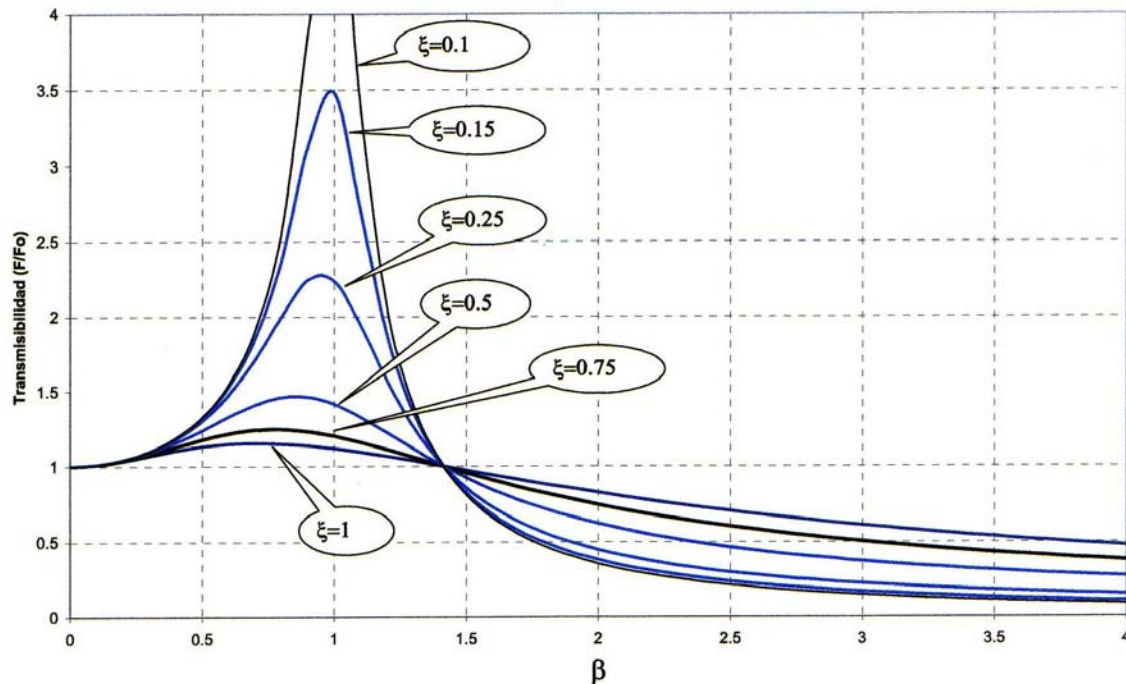


Figura 66. Variación del coeficiente de transmisibilidad en función del coeficiente de amortiguación y de la relación de frecuencias

Otro concepto que también tiene mucha importancia es el coeficiente de transmisibilidad, que se define como la relación entre el módulo de la fuerza transmitida al soporte y el módulo de la fuerza excitadora.

$$\frac{F}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + 4\xi^2\beta^2}} \quad (14)$$

La figura 66 contiene curvas para calcular el coeficiente de transmisibilidad para una relación de frecuencias y coeficiente de amortiguación conocidos. Para relaciones bajas de la fuerza transmitida es igual a la aplicada, por lo que el aislamiento no es efectivo. A medida que la fuerza crece, la fuerza transmitida se incrementa, alcanzando el máximo en la frecuencia de resonancia. A partir de este punto el aislamiento empieza a ser efectivo ya que la fuerza disminuye, cruza el punto de transmisibilidad igual a la unidad y decae rápidamente de acuerdo con la relación de amortiguamiento. Es ahora donde se explica el hecho de que cuando se diseña la frecuencia propia de un sistema aislante, debe ser por lo menos dos veces menor que la de la frecuencia de la fuerza excitadora aplicada. En este caso, si se observa el gráfico, se ve que para una $\beta = 0.5$ y $\xi = 0.1$, se tiene un valor próximo al calculado (0,8001). Este resultado es interesante pues significa que la fuerza transmitida está por debajo de la aplicada. Para obtener aislantes que atenúen más la fuerza aplicada debemos ir a β mucho mayor, del orden de 3 ó 4, donde los aislantes transmiten menos fuerza.

Capítulo 8

Conclusiones finales

A la vista de los resultados obtenidos en las simulaciones, el sistema de aislamiento de vibraciones mecánicas diseñado, cumple perfectamente su función. El aislamiento de todo tipo de vibraciones en cualquier máquina actual es muy importante en todo estudio de ingeniería. En este proyecto se han usado métodos para el cálculo y la identificación de las vibraciones, basados en simulaciones dinámicas realizadas por ordenador, con la ayuda de un programa informático. Es importante destacar el hecho de que para el cálculo de las vibraciones, se ha tenido en cuenta que el sistema no está fijo en el espacio, sino que el sistema está en movimiento, ya sea caminando, corriendo o saltando. Esto supone una gran dificultad añadida, pues la identificación del tipo de vibración se complica enormemente, porque a la hora de analizar trayectorias y aceleraciones, a los datos de vibración debidos a las fuerzas externas aplicadas en el motor, hay que sumar las inercias, aceleraciones y vibraciones debidas al movimiento propio del sistema. Con los resultados obtenidos, es evidente que el uso de técnicas de simulaciones dinámicas es muy útil para el análisis de vibraciones mecánicas.

Analizadas las 3 simulaciones y observados los resultados, es posible concretar algunos aspectos del uso del aislante. En los gráficos analizados de las simulaciones se pueden apreciar mejoras en el movimiento del torso al instalar el aislante, pues las trayectorias descritas por el centro de masas con el sistema excitado por las fuerzas externas se asemejan a las descritas en el caso ideal. Esto significa que con el aislante el sistema tiende a minimizar los efectos de las fuerzas vibratorias en los desplazamientos. Es evidente que cuanto mayor es la proximidad entre las curvas que describe el centro de masas del torso en las simulaciones ideales y con aislante de vibraciones (independientemente de si el cuadrúpedo salta, corre o anda), mayor efectividad posee el sistema de aislamiento de vibraciones.

No se puede decir exactamente lo mismo en el análisis de las aceleraciones, aunque el estudio de las curvas en este caso sea muy parecido al de las trayectorias. Esto es debido a que las aceleraciones en el caso ideal son muy pequeñas o casi nulas en comparación con los casos con fuerzas, pues en el caso ideal no hay fuerzas aplicadas. Por tanto es muy difícil conseguir que las aceleraciones de una simulación con fuerzas vibratorias se minimicen de manera que sean tan pequeñas como en una simulación sin fuerzas. No obstante se ha comprobado que las aceleraciones son de menor amplitud y frecuencia cuando se usa el aislante que sin usarlo, sobre todo en el eje Y, que es el eje en el que se analizaron las vibraciones y en el que están colocados los muelles y amortiguadores que forman el llamado aislante de vibraciones en este proyecto. Por tanto el análisis de las aceleraciones también muestra un buen grado de absorción de vibraciones mecánicas con el aislante diseñado aplicado.

Una vez analizadas las simulaciones y comparados los resultados, el estudio de las vibraciones mecánicas se centró en el eje Y para la simulación del salto, pues es la simulación que mejores resultados ha aportado para el diseño del sistema aislante de vibraciones. Las fuerzas externas aplicadas en el cuadrúpedo en las simulaciones en Adams, tenían dirección en el eje Y y el eje Z. Por lo general la vibración producida por maquinaria, motores, etc., ocurre a lo largo de más de un eje. Así por ejemplo, una máquina rotativa puede generar una



fuerza vertical y un momento rotacional, los que se transmiten a los soportes aislantes de vibración.

La razón por la cual se han estudiado las vibraciones en un solo eje es que en la mayoría de los casos los aislantes de vibraciones se diseñan para atenuar vibraciones a lo largo del eje predominante. En este proyecto se ha considerado el eje Y como predominante. Además la colocación de elementos amortiguadores y de suspensión en la dirección del eje Y facilita los cálculos y el montaje de las piezas.

Bibliografía

- [1] J. M^a Angulo, Rafael Avilés (1988), *Curso de Robótica*. Ed. Paraninfo.
- [2] Pablo González de Santos, Elena García, Joaquín Estremera (2006), *Cuadripedal Locomotion*. Ed. Springer.
- [3] Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñín, Carlos Balaguer, Rafael Aracil (2007), *Fundamentos de Robótica*. Ed. Mc Graw Hill.
- [4] José M^a Angulo Usategui, Susana Romero Yesa, Ignacio Angulo Martínez (2005), *Introducción a la Robótica*. Ed. Thomson.
- [5] http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/3D_hopper/3D_hopper.html
- [6] Kingsley, D. A., R.D. Quinn and R.E. Ritzmann (2003), *A Cockroach Inspired Robot With Artificial Muscles*. International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM 2003). Kyoto, Japan.
- [7] Fielding, M.R., R. Dunlop and C.J. Damaren (2001), *Hamlet: Force/Position Controlled Hexapod Walker - Design and Systems*. Presented at: IEEE CCA. Mexico City.
- [8] Bares, J.E. Whittaker. (1989), "Configuration of an autonomous robot for mars exploration", World Conference on robotics research: the next five years and beyond. Gaithersburg, Maryland, 1989. Research. Vol. 18, No. 7, pp. 621- 649.
- [9] Plustech. <http://www.plustech.fi> por probar)
- [10] Sony. Aibo robot. <http://www.aibo.com>
- [11] Honda. Asimo <http://asimo.honda.com>
- [12] Quinn, R.D., G.M. Nelson, R.J. Bachmann, D.A. Kingsley, J. Offi and R.E. Ritzmann (2001). Insect Designs for Improved Robot Mobility. In: Proc. of Climbing and Walking Robots Conference (CLAWAR01). Professional Engineering Publications (Berns and D. Karlsruhe, Ed.). pp. 69-76. Germany.
- [13] Eastier, T., Y. Crausaz, B. Merminod, M. Lauria, R. Piguet and R. Siegwart (2000). An innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities. Proceedings of Space and Robotics 2000. Albuquerque, USA. <http://dmtwww.epfl.ch/isr/asl/systems/shrimp.html>
- [14] Fiorini, P., S. Hayati, M. Heverly, and J. Gensler. A Hopping Robot for Planetary Exploration. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Pasadena, California.
- [15] Aldebaran Robotics Nao <http://www.aldebaran-robotics.com/pageProjetsNao.php>
- [16] www.robocup.org



- [17] MIT <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab>
- [18] <http://en.wikipedia.org/wiki/ThrustSSC>
- [19] Boston Dynamics official web page <http://www.bostondynamics.com>
- [20] Jet Propulsion Laboratory NASA <http://www.jpl.nasa.gov>
- [21] <http://www.oeb.harvard.edu/cfs>
- [22] CSIC: Instituto de Automática Industrial. www.iai.csic.es
- [23] Lynxmotion www.lynxmotion.com
- [24] Manual de usuario de MSC Adams, 2007.
- [25] William F. Riley, Leroy D. Sturges, (1996), *"Dinámica"*. Ed. Reverté.
- [26] Ogata K. (1998), *"Ingeniería de Control Moderno"*, Tercera Edición, Prentice Hall, 998.
- [27] Teoría de Mecánica Industrial, 2º curso de Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica. Universidad Carlos 3 de Madrid.
- [28] Catálogo de productos Parker. *550 Series Hydraulic Power Units*. Parker Hannifin Corporation. Oildyne division, USA.